



Eurasische Schelfmeere im Umbruch
Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See
Schlussbericht FKZ 03G0639



Sekretariat System Laptev-See
November 2010

INHALTSVERZEICHNIS

Liste der verwendeten Abkürzungen und Akronyme

I. SCHLUSSBERICHT – KURZE DARSTELLUNG.....	1
Aufgabenstellung des Verbundvorhabens.....	1
Voraussetzungen des Verbundvorhabens.....	4
Planung und Ablauf des Verbundvorhabens	5
Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	11
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
II. SCHLUSSBERICHT – EINGEHENDE DARSTELLUNG	15
TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen	15
TP 1B: Koordination	27
TP 2: Reaktionen der Polynja-Systeme auf veränderte Antriebsgrößen	31
TP 3: Isotopengeochemische Signaturen – Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean	43
TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und Abläufen	53
III. ERFOLGSKONTROLLBERICHT.....	65
Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	65
Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Verbundvorhabens	65
Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans	66
Verwertbarkeit der Ergebnisse	66
Erfindungen und Schutzrechte	67
Ungelöste Arbeitsansätze	67
IV. ZITATE.....	71
V. ANHANG	77
A – Relevante Veröffentlichungen der Projektmitarbeiter	
B – Liste der Diplom- und Doktorarbeiten	
C – Kurzfassungen der Diplom- und Doktorarbeiten	
D – Ehrungen und Auszeichnungen der Projektmitarbeiter	
E – Gastaufenthalte	
F – Liste der Forschergruppen	
G – Berichte der Forschergruppen	
H – Fahrtbericht der Sommerexpeditionen TRANSDRIFT XII, XIV und XVI	
I – Fahrtbericht der Expedition TRANSDRIFT XIII	
J – Fahrtbericht der Expedition TRANSDRIFT XV	
K – Presseberichte, Fernseh- und Hörfunkbeiträge	

Liste der verwendeten Abkürzungen und Akronyme

AARI	Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
AVHRR	Advanced Very High-Resolution Radiometer
AWI	Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, Bremerhaven
AWS	Automatische Wetterstation
COSMO	Consortium for Small Scale Modeling
CTD	Conductivity Temperature Depth Meter
DOE	Department of Energy
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
ENVISAT	Environmental Satellite (Umweltsatellit der Europäischen Raumfahrtagentur ESA)
ESA	European Space Agency
FESOM	Finite Element Sea Ice Ocean Model
GME	Globalmodell des Deutschen Wetterdienstes
HEM-Bird	Helicopter Electromagnetic Bird
HIRHAM	Regionales Klimamodell auf der Basis von HIRLAM
HIRLAM	High-Resolution Limited-Area Model
ICARP II	International Conference on Arctic Research Planning
IFM-GEOMAR	Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
IPY	International Polar Year
ISI	Information Sciences Institute
LDR	Lena-Delta-Reservat, Tiksi
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAOSIM	North Atlantic – Arctic Ocean – Sea-Ice Model
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
OSI-SAF	Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility
OSL	Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung, St. Petersburg
POMOR	Masterstudiengang für Polar- und Meereswissenschaften
SAR	Synthetic Aperture Radar
SMOS	Soil Moisture Ocean Salinity
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager
STDV	Standard deviation
TP	Teilprojekt
WNS-Polynja	West-Neusibirische Polynja

I. SCHLUSSBERICHT – KURZE DARSTELLUNG

Aufgabenstellung des Verbundvorhabens

Die Arktis spielt eine wichtige Rolle im Klimageschehen unserer Erde, da diese Region das globale Klima aktiv beeinflusst. Mit zunehmender Besorgnis wird deshalb beobachtet, dass das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Klimawandels in der Arktis während der letzten Jahre stark zugenommen haben. So hat die durchschnittliche Meereisbedeckung in den Sommermonaten der letzten 30 Jahre um bis zu 40% abgenommen (Abb. 1), und Prognosen zeigen, dass sich dieser Vorgang über Dominoeffekte beschleunigen wird. Dies wird besonders die sibirischen Schelfmeere betreffen.

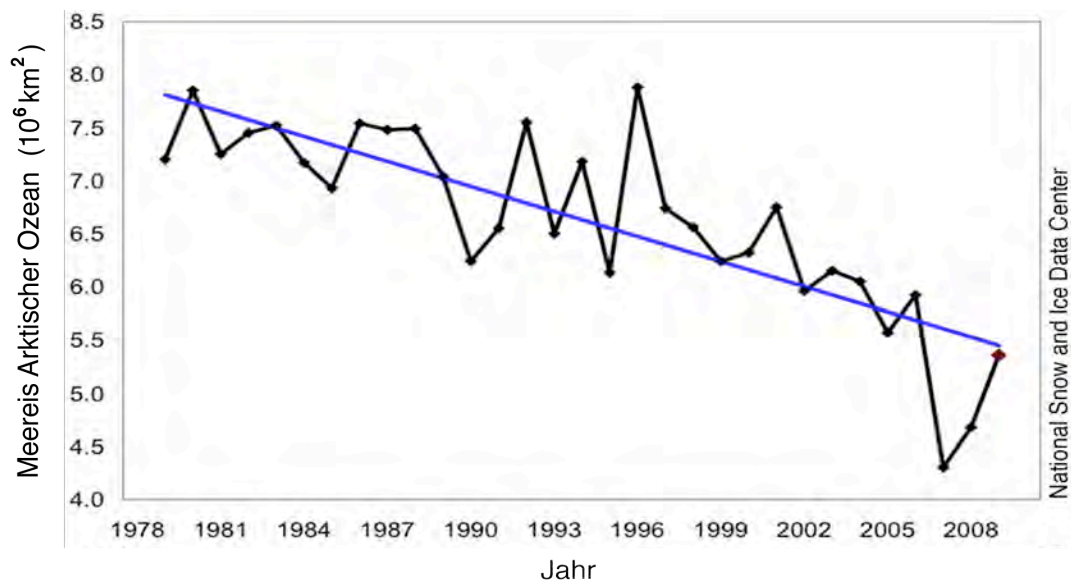


Abb. 1: Durchschnittliche Meereisbedeckung des Arktischen Ozeans im September in den Jahren 1979 bis 2009.

Von zentraler Bedeutung für die Meereisproduktion und das Ökosystem der arktischen Schelfmeere sind offene Wasserflächen, die sogenannten Polynjasysteme, die sich in den Wintermonaten entlang der Küsten zwischen Festeis und Packeis bilden (Abb. 2). Sie reagieren sehr sensibel und schnell auf Veränderungen in der ozeanischen und atmosphärischen Zirkulation und können somit als Modell dafür herangezogen werden, wie sich die klimatischen Veränderungen auf die Arktis auswirken werden.

Im Rahmen des Verbundvorhabens „System Laptev-See: Eurasische Schelfmeere im Umbruch – Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See“ haben das Arktische und Antarktische Forschungsinstitut (AARI, St. Petersburg), die Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI, Bremerhaven), das Leibniz-Institut für Mee-

reswissenschaften (IFM-GEOMAR, Kiel), das Lena-Delta-Reservat (LDR, Tiksi), die Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz und die Universität Trier Polynja- und Frontensysteme am Beispiel der Laptev-See studiert. Erste Auswirkungen der aktuellen klimatischen Veränderungen auf die Fronten- und Polynjasysteme sollten erfasst und die Folgen für die globale Klimaentwicklung aufgezeigt werden. Hierzu wurden kontinuierliche Messungen von ozeanographischen und biogeochemischen Parametern über einen Zeitraum von zwei Jahren mit Meeresobservatorien und Fernerkundungsdaten und zeitgleich Feldstudien während aller Jahreszeiten durchgeführt. Die fächerübergreifenden Datensätze wurden in Eis-Ozean-Modelle eingebunden, um die systemsteuernden Prozesse zu modellieren und so realitätsnahe Prognosen über die Aktivität der Polynja zu erstellen. Wesentlich waren dabei historische Datensätze aus der Polynja-Region, auf deren Hintergrund die aktuellen Veränderungen herausgestellt und damit beurteilt werden sollten.

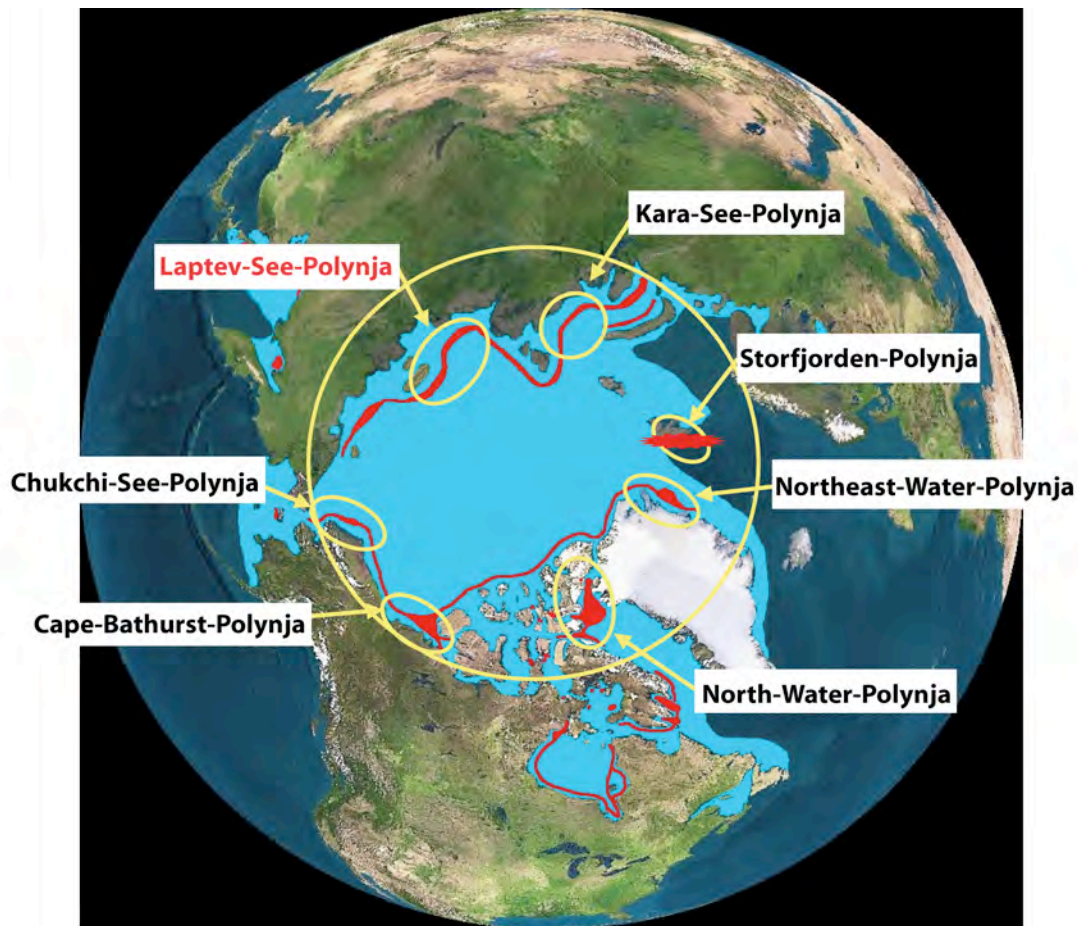


Abb. 2: Polynjasysteme im Arktischen Ozean.

Die wissenschaftliche Zielsetzung des Verbundvorhabens konzentrierte sich dabei auf die folgenden Themenfelder:

- TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen

Im Mittelpunkt stand die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den ozeanographischen Frontensystemen und dem Meereis-Polynja-System. Dazu sollten Zweijahresmessungen in der Wassersäule (Wärme, Salz, Strömungen und partikuläres Material) mit Meeresobservatorien sowie detaillierte Feldmessungen (Wärme, Salz, Strömungen, partikuläres Material, biologische Produktivität) innerhalb der Polynja im Winter und während der eisfreien Periode durchgeführt werden. Ein Vergleich der Ergebnisse mit historischen Datensätzen und Daten zu meteorologischen Bedingungen, Meereisbedeckung, Flusswasser- und Schwebstoffaustrom der Lena sollte Aufschluss über die Variabilität der Fronten- und Polynjasysteme geben, um erste Auswirkungen des Klimawandels aufzeigen zu können. Von besonderem Interesse waren dabei die Verschiebung der Jahreszeiten zu längeren Öffnungsperioden der Polynja sowie der früher eintretende Flussaufbruch der Lena.

- TP 2: Reaktionen der Polynjasysteme auf veränderte Antriebsgrößen

Das Ziel lag in der Quantifizierung der Eisproduktion und der Erfassung der daran gekoppelten Wärme-, Salz- und Stoffflüsse im Polynjasystem der Laptev-See. Durch Felduntersuchungen wie elektromagnetische Eisdickenmessungen während der Expeditionen TRANSDRIFT XIII und XV und die Erfassung von Temperatur, Salzgehalt und Strömungen in der Polynja mit Meeresobservatorien im Minuten- bzw. Stundentakt über zwei Jahre sowie hochauflösende Radarbilder und Modellsimulationen sollten Prozesse und Rückkopplungsmechanismen im System Atmosphäre-Eis-Ozean detailliert beschrieben werden. Außerdem sollte geklärt werden, ob Nährsalze und Spurenelemente als Indikatoren für physikalische und biologische Prozesse im Polynjasystem der Laptev-See genutzt werden können. Auf der Grundlage dieser Prozessstudien sollten Polynja- und Eis/Ozean-Modelle überprüft und verbessert werden, um so genauere Prognosen über die Auswirkungen der sich ändernden Meereisbedeckung im Bereich der sibirischen Schelfmeere treffen zu können.

- TP 3: Isotopengeochemische Signaturen - Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean

Die Stabilität der arktischen Oberflächenschichtung (Halokline) ist ein Schlüsselfaktor im globalen Klimawandel. Der Zustrom der Wassermassen von den sibirischen Schelfgebieten, der die Halokline erhält, ist weitgehend unbekannt. In der Laptev-See-Polynja sollte mit

stabilen Sauerstoffisotopen ($\delta^{18}\text{O}$) die Bildung der für die arktische Halokline relevanten Wassermassen untersucht werden. Die salzreichen Wassermassen, welche durch Meereisbildung in der Polynja-Region der Laptev-See entstehen, sollten quantifiziert werden. Die gemeinsame Interpretation von Salzgehalten und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten über die gesamte Wassersäule erlaubt es, den Beitrag von Flusswasser und Meereisschmelzwasser abzuschätzen. Mittels des Vergleiches der Winter- und Sommerverteilung sollten Budgets zur Gesamtmenge des gebildeten Meereises und der so gebildeten Wassermassen berechnet werden. Der Vergleich mit atmosphärischen Antriebsdaten sollte die steuernden Prozesse identifizieren. Es wurden wichtige Informationen zu Veränderungen in der Stabilität der arktischen Halokline und damit zum arktischen und globalen Klimawandel erwartet.

- TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und Abläufen

Das Ziel des Teilprojekts war die Verbesserung des Verständnisses und die Quantifizierung des Einflusses der Laptev-See-Polynja auf Prozesse des Atmosphäre/Ozean/Meereis-Systems. Mit Hilfe von Satellitendaten sollte die Langzeitvariabilität der Polynja-Aktivität und der Phytoplankton-Produktion untersucht werden. Die Algorithmen zur Ableitung der Meereisverteilung aus den Satellitendaten im optischen und Mikrowellenbereich sollten verbessert werden und zur Validierung der beim AWI vorhandenen Simulationen mit einem Eis/Ozean-Modell dienen. Die Untersuchung der Atmosphäre/Meereis-Kopplung sollte mit einem hochauflösenden dreidimensionalen Modell erfolgen. Hier lag der Schwerpunkt auf der Simulation von Polynjaprozessen und der Bestimmung des Einflusses der Polynjen auf die atmosphärischen Kreisläufe von Energie und Wasser in der Region der Laptev-See. Die Ergebnisse des Teilprojekts sind relevant für Fragestellungen der Entwicklung des arktischen Klimasystems unter dem Einfluss der globalen Klimaveränderung.

Voraussetzungen des Verbundvorhabens

Die Antragsteller verfügten bereits bei Antragstellung über langjährige Erfahrungen in der Polarforschung, insbesondere in der Zusammenarbeit mit Russland. So besteht schon seit Beginn der 1990er Jahre eine enge Kooperation mit den russischen Partnereinrichtungen, und unter dem Schirm des russisch-deutschen Forschungsprogramms „System Laptev-See“ wurden die Vorläuferprojekte, z. B. „Prozessstudien zur Dynamik des Permafrostes in der Laptev-See“ (BMBF-Vorhaben 03G0589), erfolgreich realisiert. Geprägt wurden die Forschungsarbeiten durch gemeinsame Expeditionen und Kongresse, woraus eine enge wissen-

schaftliche Partnerschaft zwischen den Wissenschaftlern aus Deutschland, Russland und der Republik Sacha gewachsen war. Als Basis hierfür diente seit seiner Gründung im Jahr 1999 das russisch-deutsche Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung (OSL) in St. Petersburg (vgl. BMBF-Verhaben 03PL037A, 03PL038A und 03PL040A).

Erste wissenschaftliche Erfahrungen in dem logistisch schwer erreichbaren Gebiet der Laptev-See-Polynja hatten die Antragsteller während der ESARE-Expedition (1993, Laptev-See-Polynja westlich Kotelnjy) und der TRANSDRIFT-VI-Expedition (1999, nördlich des Lena-Deltas) sammeln können. Unter schwierigsten Bedingungen war es z. B. 1999 erstmals gelungen, von einem Schlauchboot aus ozeanographische Messungen entlang eines knapp 100 m langen N-S verlaufenden Schnitts vom Festeis in den Randbereich der Polynja aufzuzeichnen. Aufbauend auf diesen wichtigen Felderfahrungen wurde mit dem Verbundvorhaben eine neue und effiziente Arbeitsstrategie entwickelt, damit die geplanten Forschungsarbeiten durchgeführt werden konnten.

Das Verbundvorhaben war eingebunden in das russische Partnerprojekt „System Laptev-See: Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See“ unter Federführung des AARI, das vom russischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft gefördert wurde. Die Expeditionen TRANSDRIFT XII und XIV wurden auf Einladung der russischen Partner als Fahrtabschnitte der russischen Expeditionen „BARKALAV-2007“ und „BARKALAV-2008“ in die Laptev-See und den zentralen Arktischen Ozean unter Federführung des AARI durchgeführt.

Darüber hinaus war das Verbundvorhaben zentraler Bestandteil des internationalen Wissenschaftsplans für die Arktis ICARP II (Second International Conference on Arctic Research Planning).

Planung und Ablauf des Verbundvorhabens

Die Zielsetzung des russisch-deutschen Verbundvorhabens sollte in einem fächerübergreifenden Arbeitsprogramm realisiert werden. An den Forschungsarbeiten waren Fernerkundler, Meteorologen, Ozeanographen, Physiker, Meereschemiker, Biologen, Klimamodellierer und Paläo-Ozeanographen von deutscher und russischer Seite beteiligt, deren Arbeitsansätze eng miteinander verknüpft waren. Wissenschaftliche und logistische Schnittstellen waren das Sekretariat „System Laptev-See“ in Kiel (TP 1B) und das OSL in St. Petersburg. Über das OSL wurden auch Studierende des Masterstudiengangs für angewandte Meeres- und Polarwissenschaften POMOR in die Projektarbeiten eingebunden. Darüber hinaus wurden die

gemeinsame Auswertung und Interpretation durch Aufenthalte russischer Gastwissenschaftler an den deutschen Partnereinrichtungen gestützt und ausgebaut.

Auf der russischen Seite war das Verbundvorhaben eingebunden in das Partnerprojekt „System Laptev-See: Ozeanische Fronten und Polynjasysteme in der Laptev-See“ und das IPY-Projekt „Complex Investigations of Seasonal Cycle in the Arctic Seas“, beide unter Federführung des AARI und gefördert vom russischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft.

Das Forschungsgebiet war die Laptev-See-Polynja nördlich des Lena-Deltas (Abb. 3a). Diese Region wurde ausgewählt, weil u. a. ein außergewöhnlicher Vergleichsdatensatz aus ozeanographischen, meereschemischen und biologischen Untersuchungen vorlag. Außerdem werden die Umweltbedingungen in dieser Region durch eine N-S verlaufende ozeanographische Front geprägt, die die östliche Laptev-See, deren ozeanographische, biologische und meereschemische Eigenschaften durch den Flusswasserausstrom der Lena beeinflusst werden, deutlich von der durch Wassermassen aus der Arktis und der Karasee geprägten westlichen Laptev-See abgrenzt (Abb. 3b). Das Arbeitsgebiet ist landnah und logistisch vergleichsweise einfach zu erreichen. Es ist nicht weit entfernt von den ganzjährig besetzten Polarstationen Dunaj, Tumat und Kotelnj, die meteorologische Daten für den gesamten Beobachtungszeitraum zur Verfügung gestellt haben.

Das Verbundvorhaben war auf deutscher Seite in vier Teilprojekte (TP) untergliedert:

- TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen
TP 1B: Koordination
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel
Teilprojektleiter: Dr. H. Kassens
- TP 2: Reaktionen der Polynjasysteme auf veränderte Antriebsgrößen
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
Teilprojektleiter: Dr. J. Hölemann
- TP 3: Isotopengeochemische Signaturen - Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean
Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz
Teilprojektleiter: Dr. R. Spielhagen
- TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und Abläufen
Universität Trier
Teilprojektleiter: Univ.-Prof. Dr. G. Heinemann

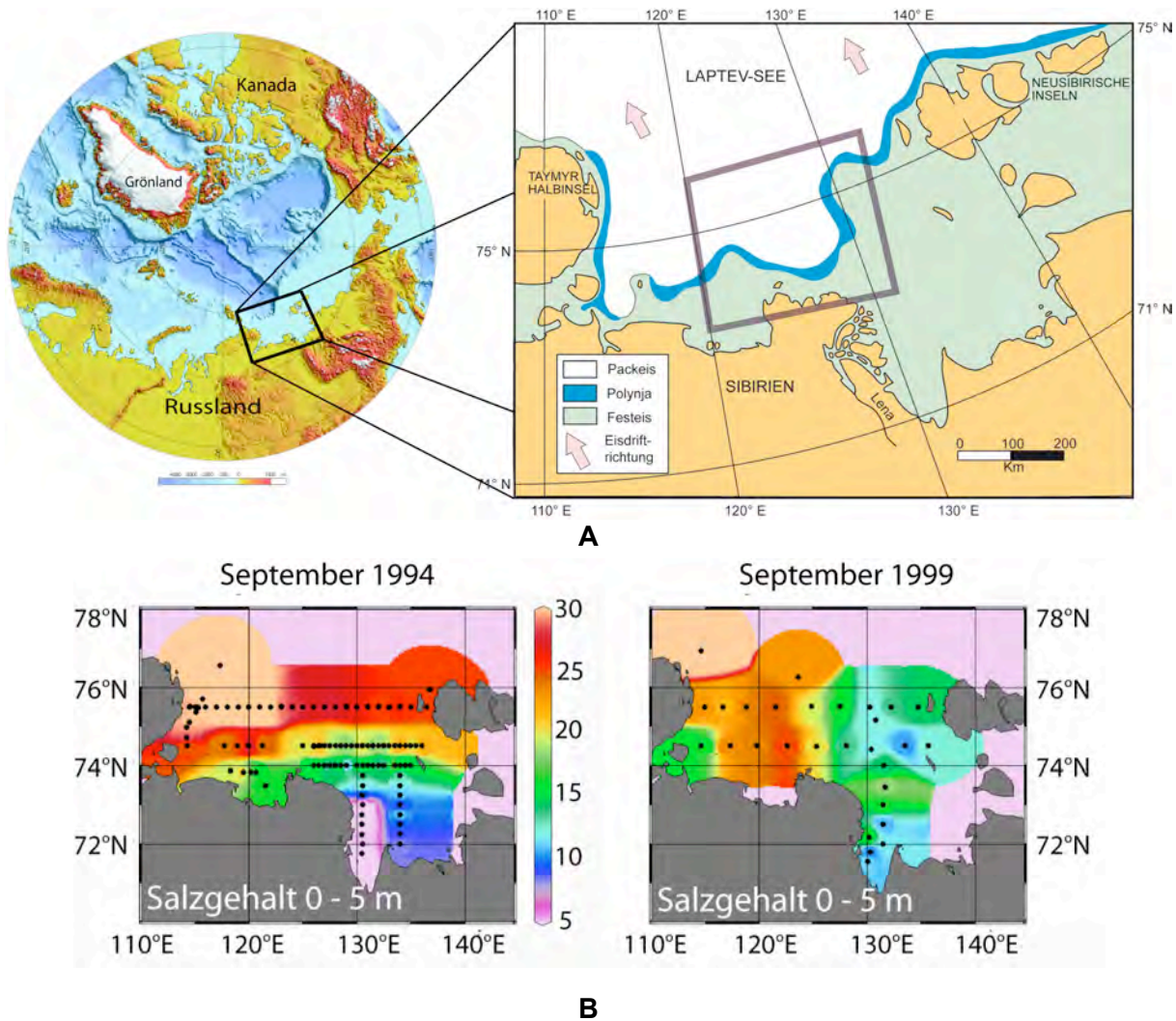


Abb. 3: A: Die Forschungsarbeiten im Rahmen des russisch-deutschen Verbundvorhabens wurden in der Laptev-See-Polynja nördlich des Lena-Deltas durchgeführt; B: Frontensysteme in der Laptev-See im September 1994 und 1999. Dargestellt ist die Verteilung der Salzgehalte im Oberflächenwasser.

In der Projektlaufzeit wurden wie beantragt sieben Expeditionen für schiffs- und landgestützte Feldstudien und Experimente (Tabelle 1) durchgeführt (eine Übersicht der Feldmethoden zeigt Abbildung 4):

- Eintägige monatliche Eiscamps (TRANSDRIFT XIII-1, XV-1): Die Wissenschaftler der russischen Partnerinstitutionen sollten im Februar bis Juli 2008 und 2009 die Eiscamps einmal im Monat für einen Tag mit Helikoptern anfliegen, um dort Probennahmen am Meeresboden, in der Wassersäule und im Meereis sowie Salinitäts- und Temperaturmessungen in der Wassersäule durchzuführen. Die Eiscamps mussten allerdings bereits im Jahr 2008 abgebrochen werden, da weder die Zelte noch die elektronischen Geräte den extremen Wetterbedingungen (Temperaturen von bis zu -48°C) standhalten konnten. Im Jahr 2009 wurden die geplanten Eiscamps nicht wieder aufgenommen.

- Winterexpeditionen TRANSDRIFT XIII und XV mit mehrwöchigen Eiscamps: Im Winter 2008 und 2009 wurden wie geplant die mehrwöchigen helikoptergestützten Expeditionen zur Laptev-See-Polynja erfolgreich durchgeführt (Abb. 5). Während der Expeditionen wurden automatische Wetterstationen für meteorologische Messungen entlang der Festeiskante der Laptev-See-Polynja eingerichtet, fünf Kurzzeitmeeresobservatorien entlang der Festeiskante eingesetzt und Eisdickenmessungen vom Hubschrauber aus durchgeführt. Zusätzlich wurden an einzelnen Stationen auf dem Festeis, an der Festeiskante und innerhalb der Polynja auf driftenden Festeisschollen ozeanographische Messungen durchgeführt sowie Eis-, Wasser- und Sedimentproben für eisphysikalische, biologische, meereschemische und sedimentologische Analysen entnommen. Im Jahr 2009 wurden erstmals vom Hubschrauber aus hochauflösende Temperaturmessungen der Eisoberfläche im Übergangsbereich vom Festeis zur Polynja aufgezeichnet.
- Schiffsexpeditionen (TRANSDRIFT XII, XIV, XVI): In den Monaten August und September der Jahre 2007, 2008 und 2009 wurden wie geplant die Sommerexpeditionen mit den russischen Forschungsschiffen „Ivan Petrov“ und „Yakov Smirnitsky“ durchgeführt. Es wurden fünf Meeresobservatorien für ein Jahr verankert und jeweils in den Folgejahren überprüft und erneut ausgesetzt. Außerdem wurden ozeanographische, meereschemische, biologische und sedimentologische Studien im Polynja-Gebiet in drei aufeinanderfolgenden Jahren durchgeführt (Abb. 6).

Tab. 1: Liste der im Rahmen des Verbundvorhabens durchgeführten Expeditionen

Expedition	Zeitraum	Arbeitsgebiet	
TRANSDRIFT XII	22.8.-22.9.2007	Zentrale Laptev-See	Forschungsschiff „Ivan Petrov“
TRANSDRIFT XIII-1	22.2.-10.3.2008	Festeis und Polynja nördlich des Lena-Deltas	Eiscamp / Hubschrauber (28.2.2008)
TRANSDRIFT XIII	6.4.-10.5.2008	Festeis und Polynja nördlich des Lena-Deltas	Eiscamps / Hubschrauber
TRANSDRIFT XIV	5.-21.9.2008	Zentrale Laptev-See	Forschungsschiff „Ivan Petrov“
TRANSDRIFT XV	15.3.-28.4.2009	Festeis und Polynja nördlich des Lena-Deltas	Eiscamps / Hubschrauber
TRANSDRIFT XVI	1.-20.9.2009	Zentrale Laptev-See	Forschungsschiff „Yakov Smirnitsky“

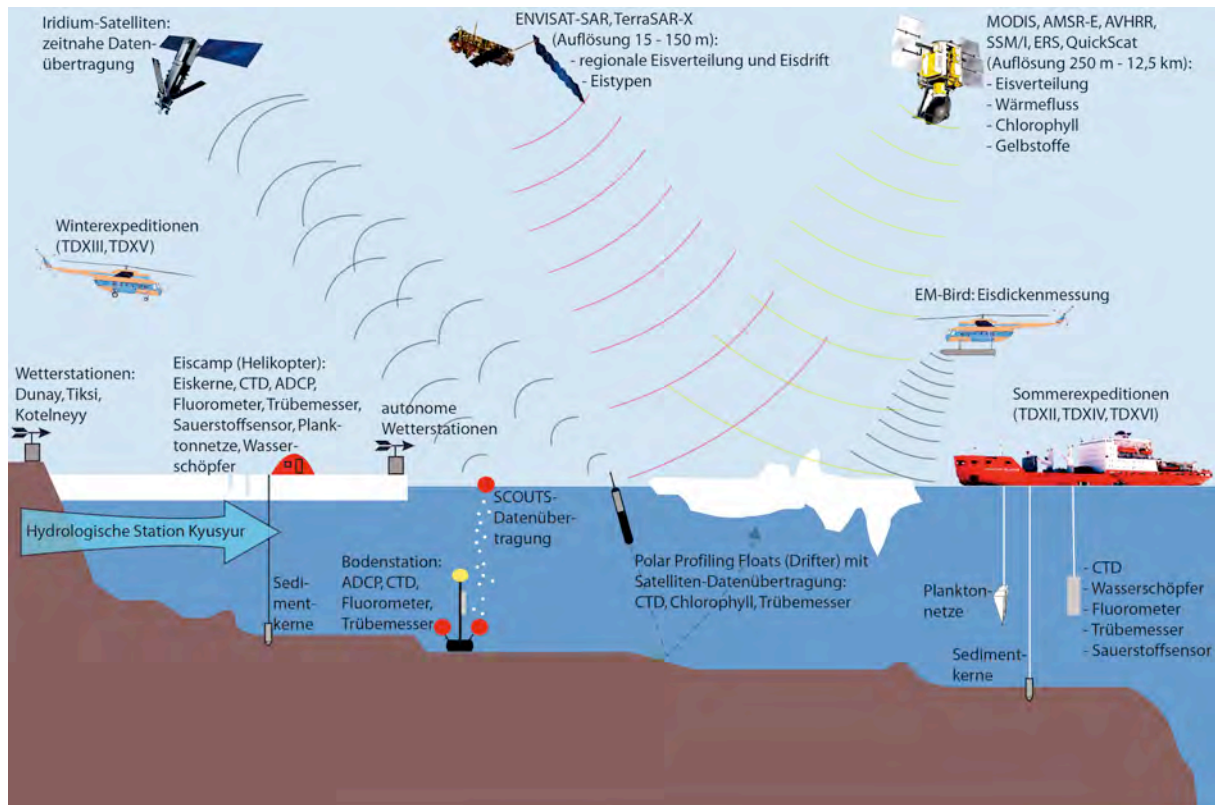


Abb. 4: Schematische Darstellung der Arbeitsplattformen und -methoden während der TRANSDRIFT-Expeditionen in den Jahren 2007 bis 2009.

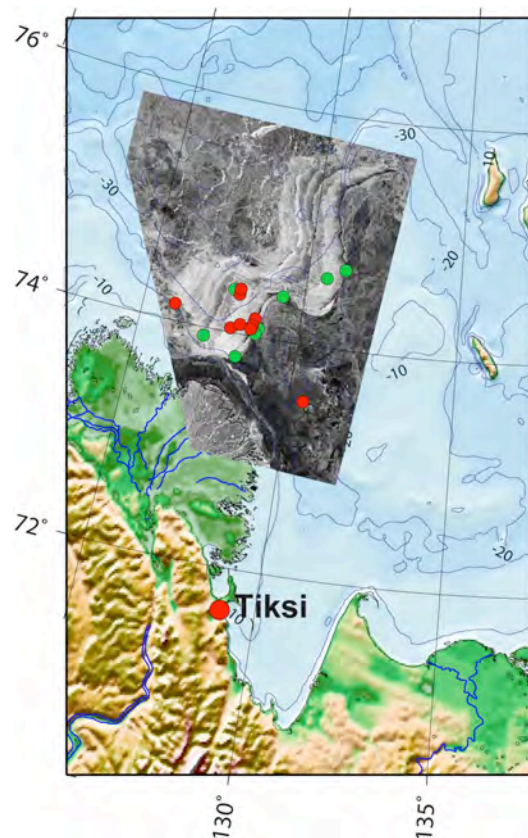


Abb. 5: Stationen der Winterexpeditionen TRANSDRIFT XIII (grüne Punkte) und XV (rote Punkte). Die Laptev-See-Polynja 2008 zeigt das hineinprojizierte ENVISAT-SAR-Satellitenbild vom 30. April 2008.

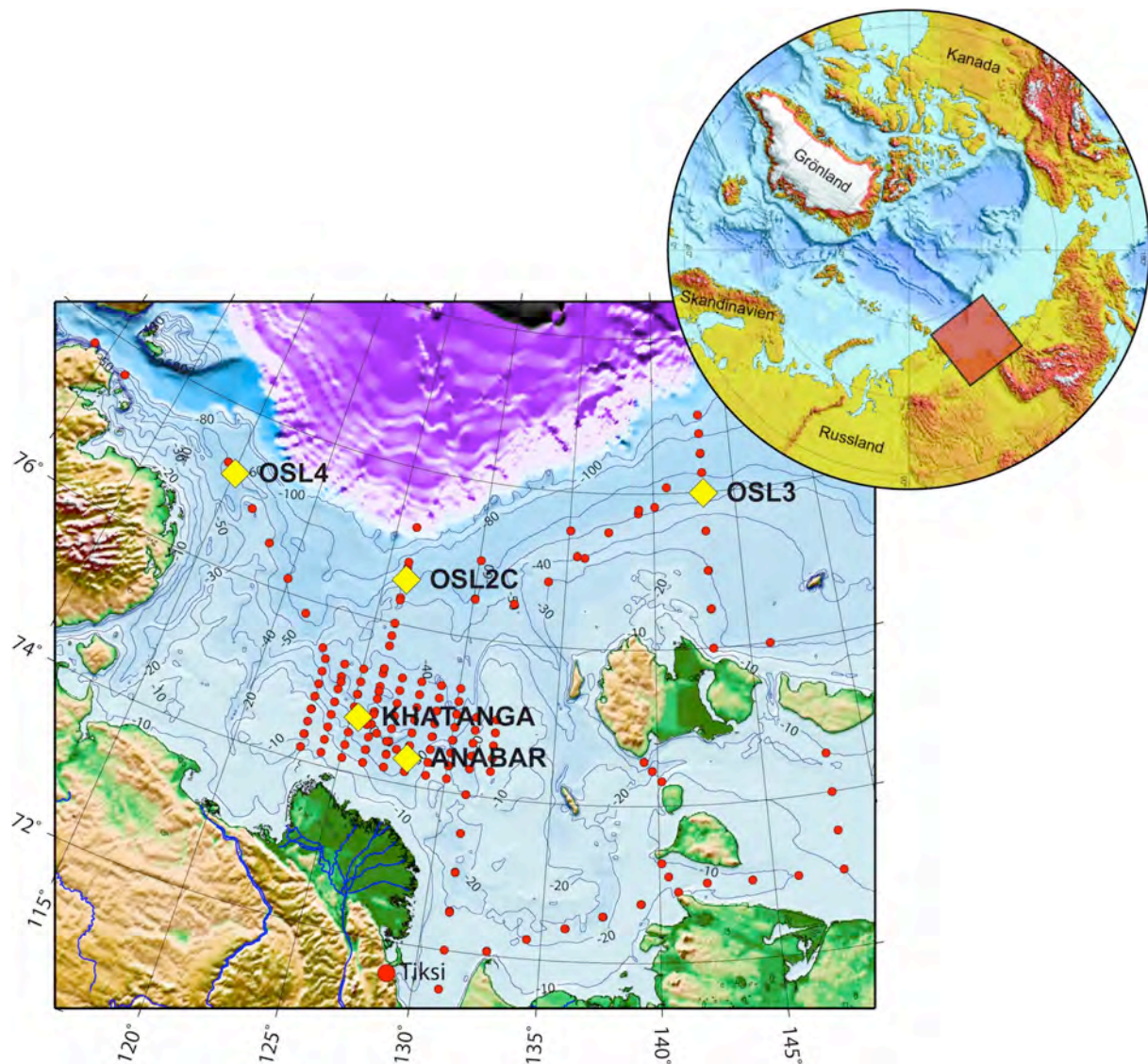


Abb. 6: Stationen der Sommerexpeditionen TRANSDRIFT XII, XIV und XVI mit Positionen der Meeresbodenobservatorien KHATANGA, ANABAR, OSL2C, OSL3 und OSL4.

Zur Vorbereitung der Expeditionen sowie zur Abstimmung der Forschungsarbeiten und zum Austausch der Ergebnisse wurden fünf nationale und drei bilaterale Arbeitstreffen durchgeführt. Eine zeitliche Übersicht der Expeditionen, Arbeitstreffen und Meeresobservatorieneinsätze findet sich in Abbildung 7.

Insgesamt konnte das Arbeitsprogramm entsprechend der Planung erfolgreich umgesetzt werden. Die einzige Ausnahme bildeten die täglichen Eiscamps im Winter.

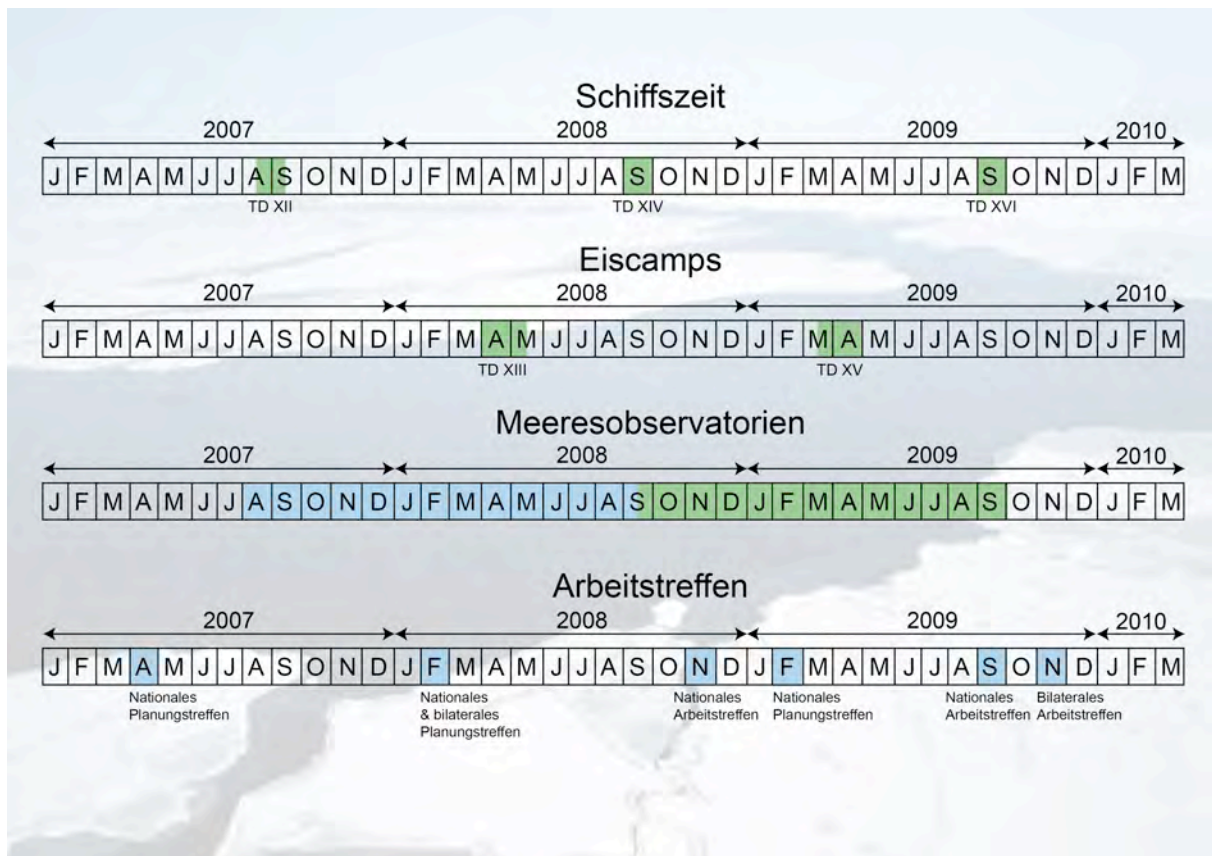


Abb. 7: Zeitliche Übersicht der Expeditionen, Arbeitstreffen und Meeresobservatorien-Einsätze während der Laufzeit des Verbundvorhabens.

Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Der Rückzug der Meereisbedeckung wird insgesamt bedeutende ökologische, sozioökonomische und geopolitische Auswirkungen haben, u. a. bessere Erreichbarkeit von Ressourcen und damit neues Interesse an Gebietsansprüchen (ACIA, 2004). Die zirkumarktischen Polynjen spielen in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle, da erwartet wird, dass sich diese offenen Wasserflächen deutlich vergrößern und für eine längere Periode geöffnet sind. Dies kann dazu führen, dass die gesamten Schelfregionen ganzjährig eisfrei bleiben. Einerseits kann dies die Entstehung neuer Navigationsrouten, Entdeckung neuer Lagerstätten von Bodenschätzen sowie neuer Fischgründe nach sich ziehen (ACIA, 2004). Andererseits werden diese Veränderungen einschneidende Auswirkungen auf das Ökosystem haben, wie Grebmeier et al. (2006) bereits in der nördlichen Beringsee beobachten konnten. Größere offene Wasserflächen werden unter anderem auch zu einer erhöhten lokalen Wolkenbildung führen, die wiederum Einfluss auf die großräumige Klimaentwicklung hat (Minnett & Key, 2007).

Einige Polynjen hatten sich bereits in den Jahren vor Projektbeginn verändert, bei anderen

zeichneten sich Änderungen in der nahen Zukunft ab (Barber et al., 2001). So hatte sich die geographische Position der Cape-Bathurst-Polynja (Abb. 2) in den vergangenen 25 Jahren deutlich verschoben (Barber & Hanesiak, 2004). Weit dramatischer zeigte sich die Entwicklung nordöstlich von Grönland, wo die Northeast-Water-Polynja (Abb. 2) aufgrund des Rückgangs der Meereisbedeckung zu einem nahezu eisfreien Schelfgebiet geworden war.

Die sibirischen Schelfpolynjas sind besonders eng an die globalen Umwelt- und Klimabedingungen gekoppelt, da hier große Mengen an Tiefenwasser und Eis gebildet und weiter in den Arktischen Ozean transportiert werden (Dmitrenko et al., 2005). Darüber hinaus wurde angenommen, dass wie die nordamerikanischen auch die sibirischen Polynjen Gebiete mit extrem hoher Primärproduktion sind (Tuschling, 1999) und eine große Bedeutung für den Kohlenstoffexport haben (Deming et al., 2002). Das Ausmaß, in dem die Polynjen auf die sich verändernden Klimabedingungen reagieren werden, war nicht abzuschätzen. Es war aber sicher, dass Veränderungen in der geographischen Lage, der Größe und/oder der Zeitspanne, in der diese Wasserflächen offen sind, sich nicht nur lokal, sondern auch auf den gesamten Arktischen Ozean und darüber hinaus auf das globale Klimasystem auswirken würden.

Insgesamt gab es über die sibirische Schelf-Polynja nur wenige international publizierte Datensätze, die auf flugzeug- und hubschraubergestützten Untersuchungen an der Festeiskante südlich der Laptev-See-Polynja beruhten (Dethleff et al., 1993; Kassens et al., 1999; Dmitrenko et al., 2001; Bauch & Kassens, 2005; Kassens et al., 2006). Darüber hinaus gab es erste Daten über die jahreszeitliche Variabilität der komplizierten Prozesse in der Laptev-See-Polynja. Diese waren mit Hilfe von drei Meeresobservatorien erhoben worden, die kontinuierliche Messergebnisse über den Zeitraum eines Jahres zu Temperatur, Strömungsverhältnissen und Schwebstoffgehalten in der Wassersäule aufgezeichnet haben. Einen Überblick über die Ergebnisse von russischen Forschungsarbeiten in den Jahren 1982-1996 im Bereich der Laptev-See-Polynja zeigt die Monographie „Ökosystem sibirische Schelfpolynja“ (1999) von A. Gukov in russischer Sprache.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Verbundvorhabens arbeiteten die deutschen Verbundpartner in der wissenschaftlichen Durchführung des Vorhabens sowie bei der Vorbereitung und Durchführung der Expeditionen äußerst eng und erfolgreich mit den russischen Partnern vom AARI, OSL und Lena-Delta-Reservat zusammen. Alle Forschungsarbeiten waren von Beginn an abgestimmt, so dass das geplante Programm effizient und erfolgreich durchgeführt werden

konnte. Darüber hinaus waren die im Folgenden aufgeführten wissenschaftlichen Einrichtungen direkt in die Forschungsarbeiten eingebunden:

Institut	Kooperationsgebiete
AARI, St. Petersburg, Russland	Meteorologie, Eisphysik, Fernerkundung, Biologie, Ozeanographie, Meereschemie, Hydrologie, Modellierung, Logistik
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moskau, Russland	Meteorologie
AWI, Bremerhaven und Potsdam	Fernerkundung, Modellierung, Ozeanographie
Bangor University, Bangor, UK	Ozeanographie
British Antarctic Survey, Cambridge, UK	Meereschemie
College of Oceanic and Atmospheric Sciences (COAS), Oregon State University, Corvallis, USA	Isotopengeochemie
Deutscher Wetterdienst (DWD)	Modellierung
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln	Fernerkundung
Europäische Luft- und Raumfahrtbehörde (ESA)	Fernerkundung
GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht	Modellierung
Hydrobase Arkhangelsk, Russland	Logistik
Hydrobase Tiksi, Russland	Logistik
Hydrometeorological Institute, Tiksi, Russland	Logistik, Wetter- und Eisdienst
International Arctic Research Center, Fairbanks, USA	Ozeanographie
Kazan State University, Russland	Biologie
Lena-Delta-Reservat, Tiksi, Russland	Biologie, Geochemie, Logistik
McGill University, Montreal, Kanada	Ozeanographie
Moscow State University, Russland	Paläoklimaforschung
Orel State University, Russland	Paläoklimaforschung
P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moskau, Russland	Ozeanographie, Meereschemie, Paläoklimaforschung
Proudman Oceanographic Laboratory (POL), Liverpool, UK	Modellierung
St. Petersburg State Polytechnical University, Russland	Ozeanographie
St. Petersburg State University, Russland	Masterstudiengang POMOR
Universität Hamburg	Fernerkundung
University of Alberta, Edmonton, Kanada	Meereisphysik
University of Washington, Seattle, USA	Ozeanographie
VNIOkeangeologia, St. Petersburg, Russland	Geologie, Geophysik

Eng kooperiert hat das Verbundvorhaben mit folgenden Projekten:

- IPY-Projekt der Russischen Föderation „Complex Investigations of Seasonal Cycle in the Arctic Seas“ unter Federführung des AARI.
- Umweltmonitoring-Programm „Biosphärenreservat Lena-Delta“ unter Federführung des Lena-Delta-Reservats der Republik Sacha und des Hydrometeorologischen Instituts in

Tiksi (Außenstelle AARI); die Arbeitsziele des Verbundvorhabens waren eng mit diesem Programm verknüpft (TRANSDRIFT XIII und XV);

- NABOS 2006 und 2007 (www.nabos.iarc.uaf.edu). Ziel des am International Arctic Research Center in Fairbanks (Alaska) angesiedelten Projektes war die quantitative Einschätzung der Ozeanzirkulation und Wassermassenbildung im zentralen Arktischen Ozean. Im Rahmen des Projektes und unter Federführung von TP 2 wurden 2005, 2006 und 2007 Meeresobservatorien am Kontinentalrand der Laptev-See und in der Sewernaja-Semlja-Polynja verankert (enge Kooperation mit TP 1, 2, 3);
- Kanadisches IPY-Projekt „Circumpolar Flaw Lead (CFL) System Study“ (www.umanitoba.ca/ceos/files/CFL_IPY_proposal_Final.pdf; www.ifremer.fr/ifrtp/pages/API%202007-2008/IPY/687.pdf). Ziel des multidisziplinären Forschungsprojektes war eine Überwinterung in der Cape-Bathurst-Polynja an Bord des kanadischen Forschungseisbrechers CCG “Amundsen”;
- US-amerikanisches IPY-Projekt „Integrated Arctic Ocean Observing System-2: Shelf-Basin Exchanges (SBE)“ (www.ipy.org/development/eoi/details.php?id=522). Ziel waren u. a. multidisziplinäre Studien in der Tschuktschensee-Polynja;
- IPY-Projekt „GEOTRACES - An International Study of the Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Isotopes in the Arctic and Southern Oceans“ (www.ipy.org/development/eoi/proposal-details.php?id=35) unter Federführung des Royal Netherlands Institute for Sea Research (enge Kooperation mit TP 2).

Die fachliche und logistische Abstimmung mit diesen Projekten erfolgte während eines Arbeitstreffens im Rahmen des vom IB des BMBF geförderten Projektes IMPETUS vom 23. bis 25.6.2006 am OSL in St. Petersburg.

II. SCHLUSSBERICHT – EINGEHENDE DARSTELLUNG

TP 1A: Jahreszeitliche und räumliche Variabilität von ozeanographischen Fronten und Transportprozessen

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Im Mittelpunkt des Teilprojektes stand die Untersuchung der komplexen Wechselwirkungen zwischen dem ozeanographischen Frontensystem des Flusswassers der Lena und des Schelfwassers der Laptev-See auf der einen und dem Meereis-Polynja-System auf der anderen Seite. Um die Auswirkungen von jahreszeitlichen Verschiebungen auf die komplexen Wechselwirkungen abschätzen zu können, wurden Transport- und Frontenprozesse (Austausch von Wärme, Salz, Schwebstoffen und Nährstoffen zwischen dem Lena-Ausstrom und dem Schelfwasser) und ihre jahreszeitliche und räumliche Variabilität über zwei Jahreszyklen durch Langzeitmessungen und detaillierte Feldmessungen sowohl während der eisfreien Monate als auch innerhalb der Polynja erfasst, mit historischen Datensätzen verglichen und charakterisiert.

Dazu wurden während der Schiffsexpeditionen TRANSDRIFT XII, XIV und XVI zusammen mit den russischen Partnern erfolgreich zwei Meeresobservatorien (ANABAR und KHATANGA) im Bereich der ozeanographischen Front zwischen dem Flusswasserausstrom der Lena und dem Schelfwasser und in der Großen Sibirischen Schelfpolynja nördlich und nordöstlich des Lena-Deltas ausgebracht und eingeholt. Die Meeresobservatorien liefern einen einmaligen Datensatz für den Zeitraum von zwei Jahren über die jahreszeitliche Variabilität von Transport- und Frontenprozessen und ihre räumlichen Variabilitäten innerhalb des ozeanographischen Frontensystem und des Meereis-Polynja-Systems.

Um ergänzend die vertikale und horizontale Verteilung und Variabilität von Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoffen und Plankton zu untersuchen, wurden sowohl während der Schiffsexpeditionen XII, XIV und XVI als auch während der helikoptergetriebenen Winterexpeditionen TRANSDRIFT XIII und XV detailliert Feldmessungen vorgenommen. Dazu wurde während der Schiffsexpeditionen erstmals ein engmaschiges Netz an Messungen innerhalb des ozeanographischen Frontensystems zwischen dem Flusswasser der Lena und dem Schelfwasser der Laptev-See im Bereich der Positionen der Meeresobservatorien durchgeführt. Erweiternd wurden Messungen auf dem inneren östlichen und dem äußeren Laptev-See-Schelf und in der westlichen Ostsibirischen See vorgenommen. Während der helikopter-

gestützten Winterexpeditionen wurden Kurzzeitobservatorien unterhalb des Festeises verankert und zusätzliche Feldmessungen vorgenommen. Damit steht ein einmaliger Datensatz über die Dynamik von ozeanographischen Fronten- und Transportprozessen und ihre jahreszeitliche und räumliche Variabilität zur Verfügung. Innerhalb des Verbundvorhabens konnten die direkten Auswirkungen der außergewöhnlichen Randbedingungen des Sommers 2007, die durch ein Rekord-Minimum in der sommerlichen Meereisbedeckung über der gesamten Arktis charakterisiert wurden (z. B. Comiso et al., 2008; Kwok et al., 2009), auf die Sommerhydrographie des Laptev-See-Schelfs und auf den Winter 2007/08 sowie die weitere Entwicklung in den beiden darauffolgenden Jahren erfasst werden.

Die Oberflächenwassertemperaturen im Sommer 2007 lagen auf dem inneren Laptev-See-Schelf bis zu 3°C über dem langjährigen Mittel (1937-2000). Auch im äußeren Schelfbereich der östlichen Laptev-See wurden wärmere Oberflächentemperaturen (1-3°C wärmer) und niedrigere Salzgehalte (3-4 psu weniger) aufgezeichnet (Abb. 1). Während der eisfreien Monate im Sommer 2007 herrschten Winde aus westlichen Richtungen vor, die zu einem Transport des Flusswassers nach Osten führten. Während dieser sogenannten „On-shore“-Jahre (Dmitrenko et al., 2008; Bauch et al., 2009a) können bis zu 500 km³ Süßwasser vom Laptev-See-Schelf in die Ostsibirische See exportiert werden (Dmitrenko et al., 2008). Die sommerliche Oberflächenschwebstoffverteilung ist eng mit der Verteilung des Flusswassers verbunden (Wegner et al., 2003, 2005). 2007 wurden stark erhöhte Schwebstoffkonzentrationen insbesondere auf dem inneren östlichen Schelf festgestellt, die ein Hinweis auf einen erhöhten Export von Sedimenten in die Ostsibirische See sind. Gleichzeitig wurden im äußeren östlichen Schelfbereich in Bodennähe die höchsten Schwebstoffkonzentrationen entlang des Kontinentalhangs der Laptev-See aufgezeichnet. Durch den verminderten Süßwasserexport vom Laptev-See-Schelf während der „On-shore“-Jahre ist die Wassersäule in der äußeren östlichen Laptev-See weniger stratifiziert. Durch die vertikale Durchmischung kann es zur Resuspension von Bodenmaterial und einem möglicherweise erhöhten Eintrag von Schwebstoffen am Kontinentalrand kommen. Im darauffolgenden Sommer 2008 breitete sich das Flusswasser der Lena aufgrund von vorherrschenden Winden aus südlichen Richtungen weiter nach Norden aus, was zu deutlich niedrigeren Oberflächensalzgehalten im Vergleich zum langjährigen Mittel führte (bis zu zwei Standardabweichungen niedriger). In diesen sogenannten „Off-shore“-Jahren (Dmitrenko et al., 2008; Bauch et al., 2009a) können bis zu 500 km³ Süßwasser vom Laptev-See-Schelf in den tiefen Arktischen Ozean exportiert werden (Dmitrenko et al., 2008). 2009 war wiederum ein „On-shore“-Jahr. Die Oberflächensalzge-

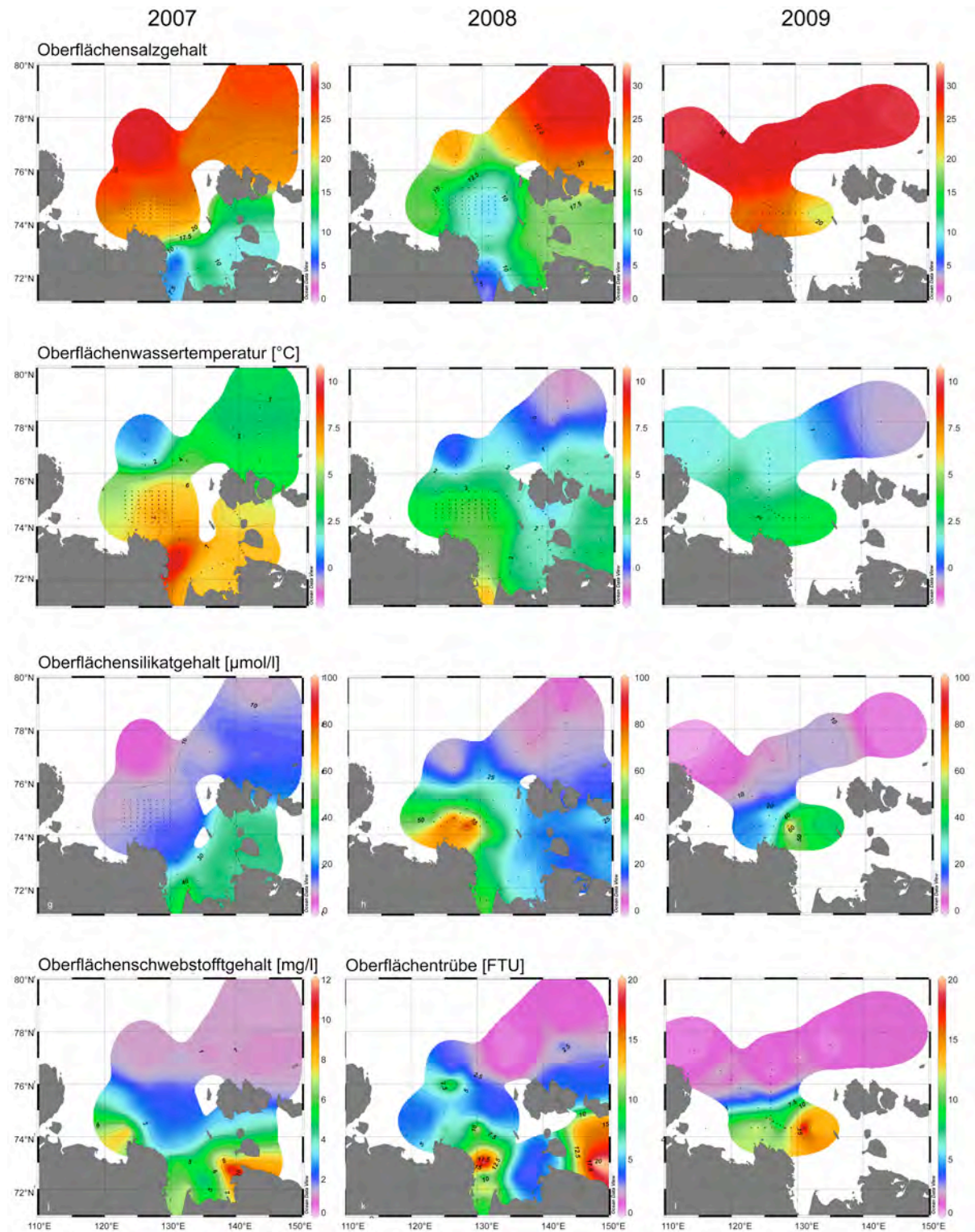


Abb. 1: Oberflächensalzgehalte (a-c), Oberflächenwassertemperaturen (°C; d-f), Oberflächensilikatgehalte ($\mu\text{mol/l}$; als Indikator für den Flusswassereintrag der Lena; g-i) sowie Oberflächenschwebstoffgehalt (mg/l) und Oberflächentrübe (FTU: Formazine Turbidity Unit) als Maß für die Schwebstoffkonzentration (j-l) aus den Sommern 2007-2009.

halte auf dem inneren Schelf erreichten ein ähnliches Niveau wie 2007. Die Untersuchungen des Verbundvorhabens zeigen deutlich die zentrale Rolle der atmosphärischen Zirkulation für

die räumliche Variabilität der Transport- und Frontenprozesse. Setzt sich der Trend hin zu häufigeren „On-shore“-Jahren auf dem Laptev-See-Schelf (Simmonds & Keay, 2009) fort, kann dies weitreichende Folgen nicht nur für das Sedimentbudget der Laptev-See, sondern auch für das empfindliche Ökosystem haben.

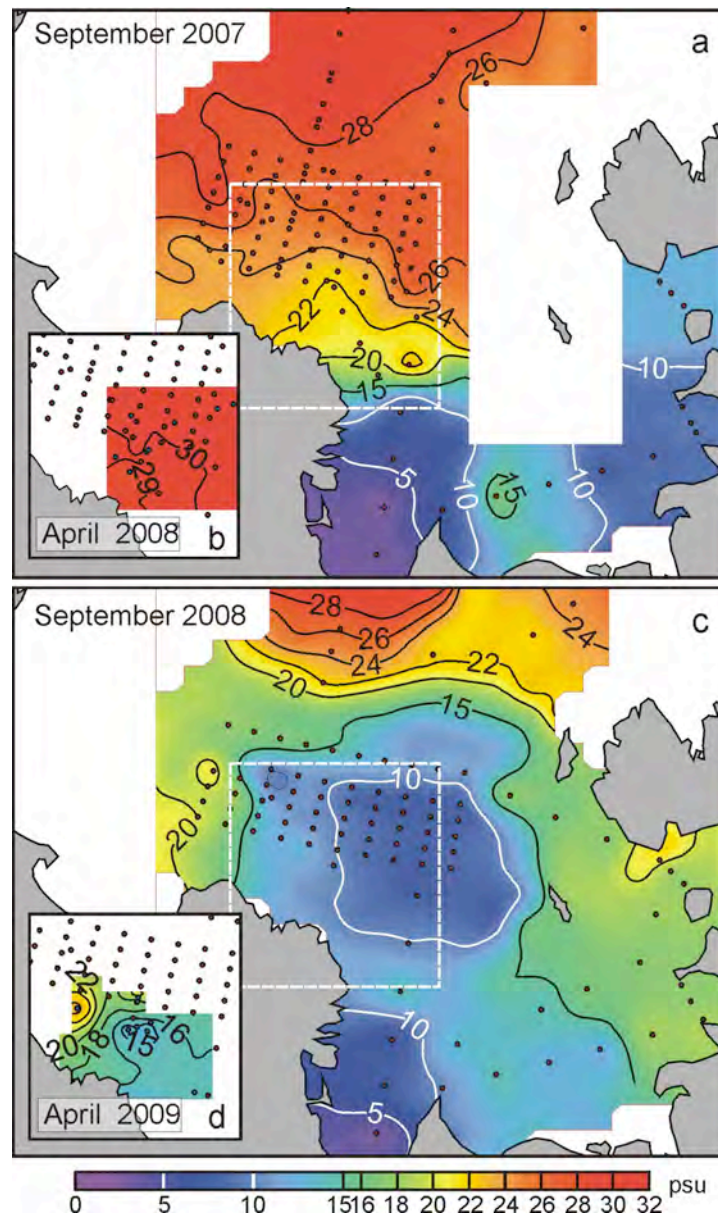


Abb. 2: Oberflächensalzgehalte (psu) auf dem südöstlichen Laptev-See-Schelf im September 2007 (a) und September 2009 (c). (b) zeigt den Oberflächensalzgehalt im April 2008 und (d) im April 2009 im weißgestrichelten Ausschnitt. Rote Punkte symbolisieren die Sommermessungen, die blauen Punkte die Wintermessungen.

Die Sommerhydrologie auf dem Laptev-See-Schelf (Verteilung von Flusswasser auf dem inneren und mittleren Schelf) ist wichtig für den Zeitablauf des Zufrierens, für die Meereisbildung und die Winter-Hydrographie (Bauch et al., 2009b; Dmitrenko et al., subm.; Abb. 2).

So setzte nach dem extrem warmen Sommer 2007 das Zufrieren im Herbst 2007 in der östlichen Laptev-See im Vergleich zum Herbst 2008 später ein (Ergebnisse TP 4). Die Polynja öffnete sich im Frühjahr 2008 häufiger als im darauffolgenden Jahr, was sich in vergleichsweise niedrigeren Wassertemperaturen und höheren Salzgehalten widerspiegelte (Abb. 3). Während der helikoptergestützten Winterexpeditionen TRANSDRIFT XIII (April 2008) und XV (April 2009) wurden im Bereich der Polynja in der Nähe des Lena-Deltas außergewöhnlich große Unterschiede in den Salzgehalten ermittelt. Die Oberflächensalzgehalte im April 2009 waren 8-16 psu niedriger als im April 2008 (Abb. 3). Dies kann mit der unterschiedlichen Verteilung der Flusswasserlinse im Sommer 2008 im Vergleich zum Sommer 2007 in Verbindung gebracht werden, die zu ungewöhnlich niedrigen Oberflächensalzgehalten im Sommer 2008 geführt hat (Abb. 1; Dmitrenko et al., subm.).

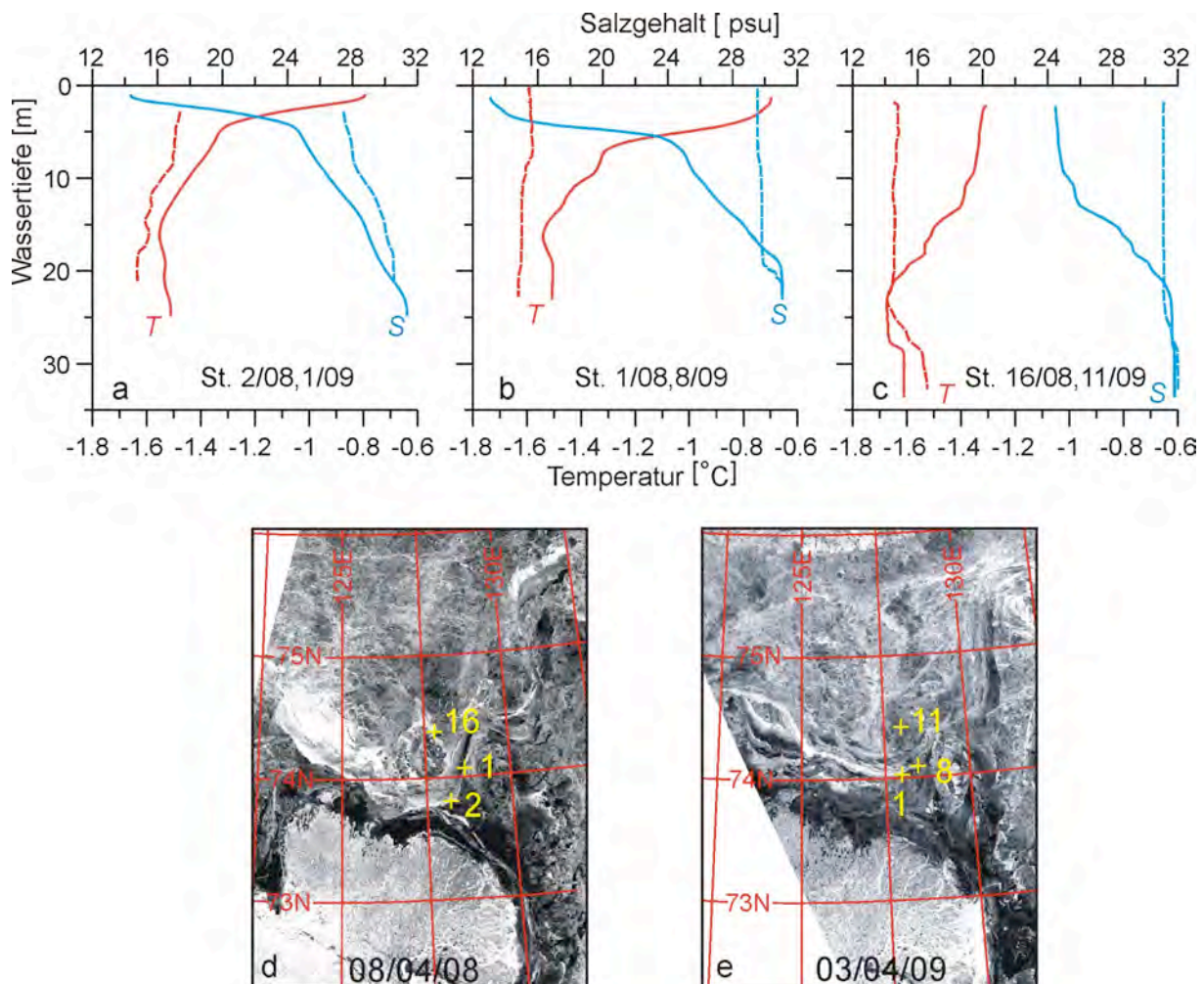


Abb. 3: (a-c) Temperatur- (°C; rot) und Salzgehaltsverteilung (psu; blau) im April 2008 (gestrichelte Linie) und im April 2009 (durchgezogene Linie) innerhalb der Polynja in der südöstlichen Laptev-See spiegeln die unterschiedlichen Wintersituationen wider, die innerhalb des noch laufenden Verbundvorhabens erfasst werden konnten (nach Dmitrenko et al., subm.). Die Positionen der jeweiligen Stationen sind auf den ENVISAT-SAR-Bildern mit Kreuzen markiert (d-e).

Zusätzlich wurde während der Winterexpedition TRANSDRIFT XIII im April 2008 auf dem inneren Schelf in den dort ausgebrachten Kurzzeit-Meeresobservatorien (Wassertiefe 20-22 m) ebenfalls ein Anstieg der Bodenwassertemperaturen festgestellt (Abb. 4). Der Anstieg um $0,2^{\circ}\text{C}$ geht einher mit einem Anstieg des Salzgehaltes um 1-1,5 psu. Dies wird möglicherweise durch den Einstrom von durch atlantisches Zwischenwasser beeinflussten Wassermassen vom äußeren Schelf auf den inneren Schelf verursacht (Dmitrenko et al., in press). Ergebnisse aus den Langzeit-Meeresobservatorien KHATANGA und ANABAR aus den Jahren 2007-2009 weisen allerdings darauf hin, dass dieses erwärmte Bodenwasser möglicherweise ein Relikt des vom Sommer erwärmten Wassers aus der westlichen Laptev-See sein könnte (Hoelemann et al., accepted). Die Herkunft des erwärmten Bodenwassers auf dem inneren Schelf im Winter ist bisher ungeklärt.

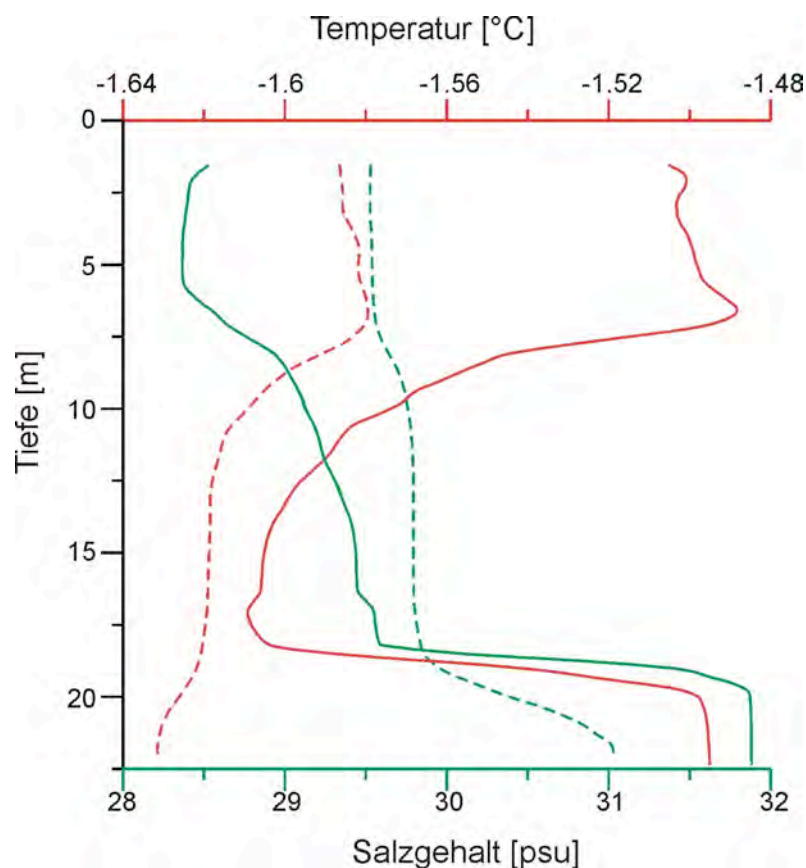


Abb. 4: Temperatur- ($^{\circ}\text{C}$, rot) und Salzgehaltsverteilung (psu, grün) unterhalb der Festeiskante der Polynja nördlich des Lena-Deltas in 22 m Wassertiefe vom 10. April 2008 (gestrichelte Linie) und vom 28. April 2008 (durchgezogene Linie) zeigen den Anstieg der Bodenwassertemperaturen, der mit dem Einstrom von OSW (Outer Shelf Water) bis auf den inneren Schelf in Verbindung gebracht werden kann (nach Dmitrenko et al., in press).

Wenn sich aufgrund von ablandigen Winden von der sibirischen Küste her im Winter die Große Sibirische Schelfpolynja auf dem Laptev-See-Schelf öffnet und das nun nicht mehr

eisbedeckte Oberflächenwasser den kalten Lufttemperaturen von bis zu -35°C ausgesetzt ist, erreicht das Oberflächenwasser Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes und wird „supercooled“. Dies führt zur Bildung von kleinen, millimetergroßen Eiskristallen im Oberflächenbereich, den sogenannten „Frazil-Eis“-Kristallen, die an die Wasseroberfläche driften (Skogseth et al., 2009). Die Prozesse, die die Meereisbildung aufgrund von „Supercooled“-Bedingungen im Oberflächenwasser und der „Frazil-Eis“-Bildung steuern, sind in der sibirischen Arktis aufgrund der sehr geringen Datenabdeckung insbesondere während der Wintermonate kaum bekannt (Dmitrenko et al., 2009). Erstmals konnte im Rahmen des Verbundvorhabens im April-Mai 2008 durch die Kombination aus ENVISAT-ASAR- und TerraSAR-X-Satellitenbildern (TP 2), Luftaufnahmen (TP 2), meteorologischen Datensätzen (TP 4) und CTD (Conductivity Temperature Depth Meter)- und ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)-Messungen in den während der helikoptergestützten Winterexpedition TRANDRIFT XIII verankerten Kurzzeitobservatorien die hydrologische Reaktion auf kurzfristige Veränderungen im Meereis-Polynja-System untersucht werden. Im o. a. Zeitraum konnte aufgrund von ENVISAT-ASAR-Satellitenbildern das stärkste Polynjaereignis bezüglich der Meereisbildung Ende April festgestellt werden (Ergebnisse TP 2). Die TerraSAR-X-Satellitenbilder vom 29. April 2008 (Abb. 5a) und Luftaufnahmen (Abb. 5c) zeigen Anzeichen der „Frazil-Eis“-Bildung entlang der Festeiskante im Bereich des Kurzzeitobservatoriums M2 (Abb. 5b) und weiter nördlich. Im selben Zeitraum zeichneten die CTD der Kurzzeitobservatorien Oberflächenwassertemperaturen im Bereich des Gefrierpunktes oder $0,02^{\circ}\text{C}$ darunter auf (Abb. 6) und die ADCP maximale akustische Rückstreuungswerte an der Oberfläche, die einen Hinweis auf „Frazil-Eis“-Bildung geben (Abb. 6). Durch die akustischen Rückstreuungswerte können ADCPs Hinweise auf „Frazil-Eis“-Kristallen in der Wassersäule geben (z.B. Morse et al., 2006; Richard & Morse, 2008), jedoch keine absoluten Werte der „Frazil-Eis“-Konzentration aufgrund der fehlenden Kalibration. Nach Jasek & Marko (2007) können durch die in den Kurzzeitobservatorien installierten 307-kHz-ADCP „Frazil-Eis“-Kristalle im Größenbereich von 1 bis 20 mm erfassen.

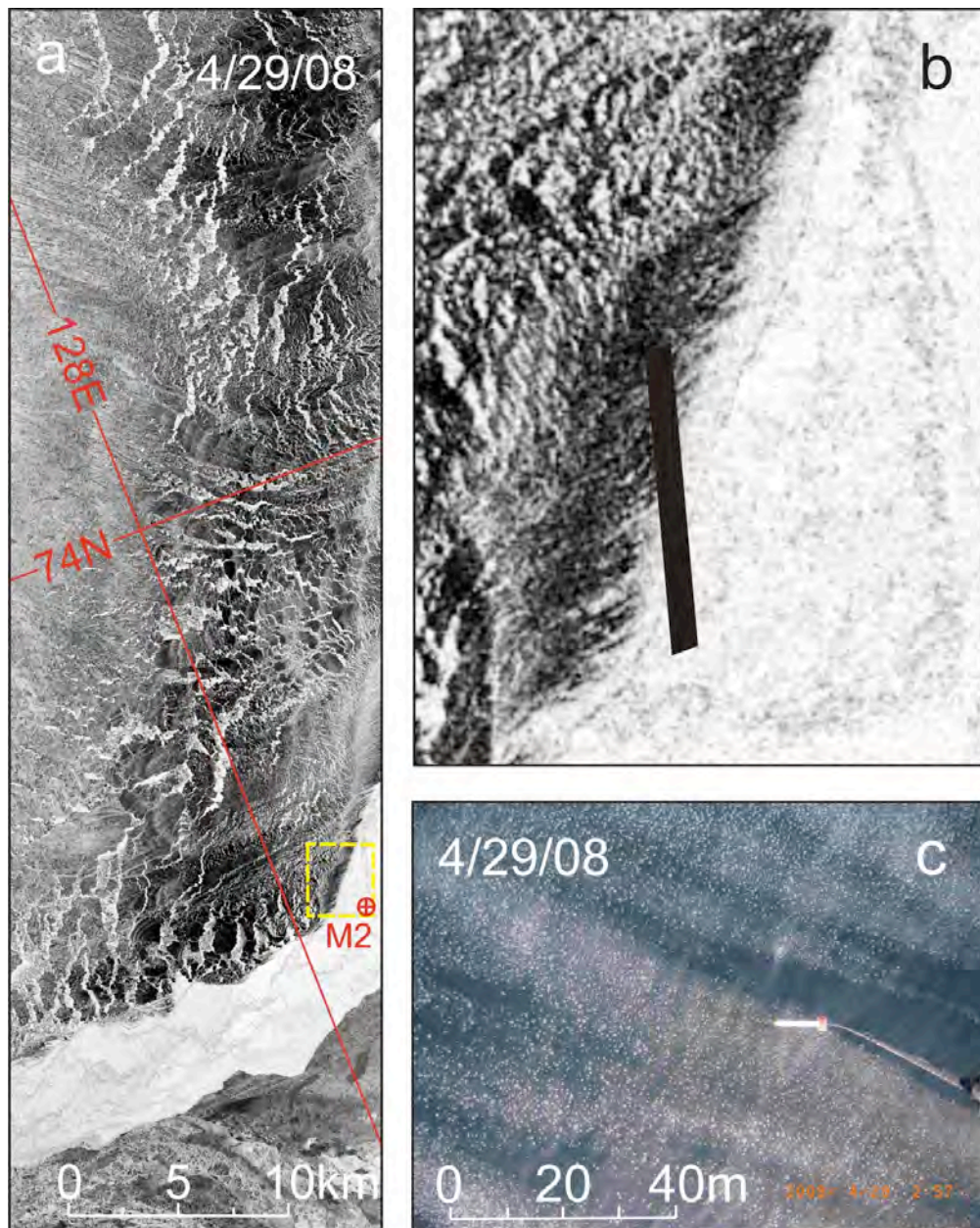


Abb. 5: TerraSAR-X-Satellitenbild vom 29. April 2008 entlang der Festeiskante (a). Das gelbe Rechteck umreißt das Gebiet um Kurzzeitobservatorium M2, das in (b) nochmals vergrößert wurde. Luftaufnahme vom 29. April 2008 bei ungefähr 75°N (c; nach Dmitrenko et al., 2009; für genaue Positionen siehe dort).

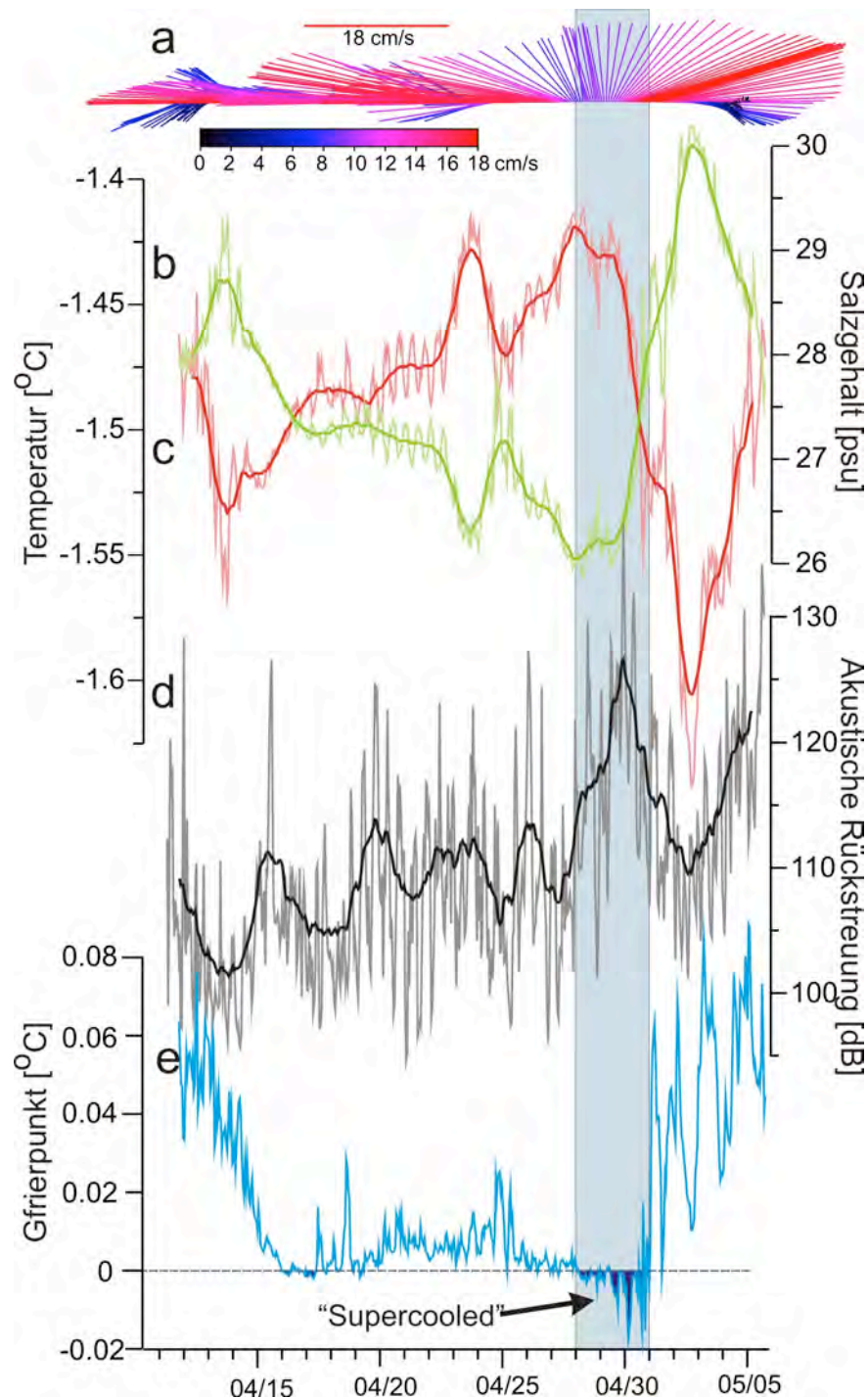


Abb. 6: Aufzeichnungen des Kurzzeitobservatoriums M2 vom 11. April bis 5. Mai 2008. (a) Residuale Strömung in 5,4 m Tiefe, (b) Salzgehalt in grün und (c) Temperatur in rot (°C) in 4,5 m Tiefe, (d) akustische Rückstreuung in schwarz (dB) in 5,4 m Tiefe und (e) die Differenz zwischen der gemessenen Temperatur und dem Gefrierpunkt in 4,5 m Tiefe (nach Dmitrenko et al., 2009).

Die Meereisproduktion in der Polynja kann u. a. mit Hilfe des Unterschieds in den Sommer- und Wintersalzgehalten ermittelt werden (Dmitrenko et al., 2009). Generell wird der Salzgehalt im Bereich der Polynja stark durch die Meereisproduktion beeinflusst (Zakharov, 1966; Dmitrenko et al., 2005). Der Unterschied in den Salzgehalten im Winter und im Sommer kann

deshalb als ein Maß für die winterliche Meereisproduktion angenommen werden (Dmitrenko et al., 2009). Dadurch konnte eine mittlere Meereisproduktion von 964 km^3 innerhalb der Polynja ermittelt werden (Dmitrenko et al., 2009). Diese Abschätzung der Meereisproduktion ergibt allerdings deutlich höhere Werte als Berechnungen aus Satellitendaten (Ergebnisse TP 2) oder mit dem Atmosphären/Eis/Ozean-Modell (Consortium for Small Scale Modeling-Finite Element Sea Ice Ocean Model – COSMO-FESOM; Schroeder et al., subm.). Der oben beschriebene Ansatz schließt einen Zustrom von salzhaltigem Wasser jenseits des Definitionsbereichs aus. Außerdem weisen Berechnungen durch Dmitrenko et al. (2009) darauf hin, dass die Werte der Meereisproduktionsraten stark mit dem angenommenen Salzgehalt im neu gebildeten Eis variieren (Abb. 7).

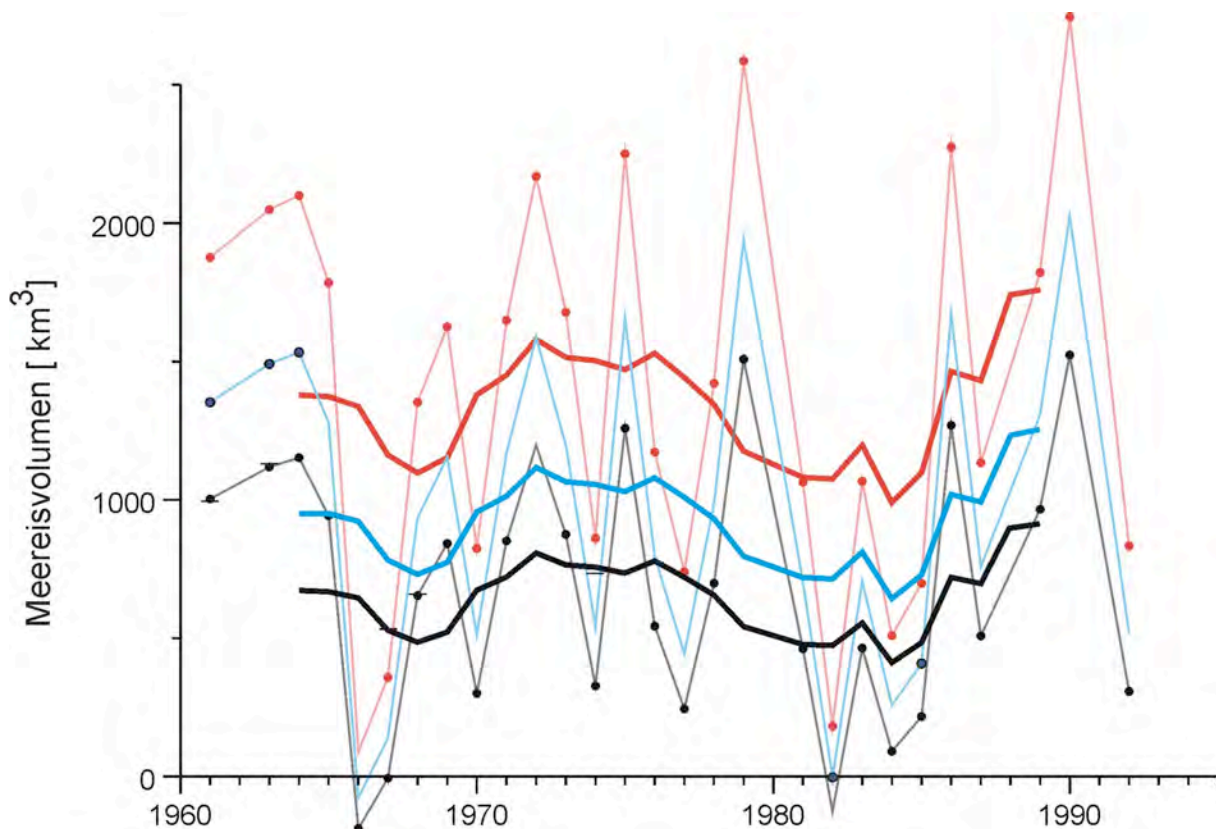


Abb. 7: Integrierte Netto-Meereisproduktion in der Laptev-See (km^3) von 1961-1993 nach Dmitrenko et al. (2009). Schwarze, blaue und rote Linie zeigen jeweils die berechnete Produktionsrate für neu gebildetes Eis mit einer Mächtigkeit geringer als 150 cm mit Salzgehalten von 0, 4, und 8 psu. Die dicken Linien zeigen ein 7-jähriges Mittel.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Erfassung von Umweltparametern (Hydrologie, Strömungen, Transportprozesse) ist eine grundlegende Voraussetzung für das Verständnis von Klimaveränderungen und deren Pro-

gnose, für die Erweiterung von bestehenden Modellen und somit auch für die Entwicklung von Entscheidungshilfen im Schelfmanagement. Die Datensätze werden nach Abschluss der Arbeiten in Datenbanken (PANGAEA – Network for Geological and Environmental Data) archiviert und stehen somit für eine weitere Nutzung zur Verfügung. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sollen in Fachzeitschriften (ISI-gelistet) veröffentlicht werden.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 1B: Koordination

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das Koordinationsteam führte das am IFM-GEOMAR angesiedelte Sekretariat „System Laptev-See“ als die zentrale Anlaufstelle des Verbundvorhabens weiter. Ihm oblag die Aufgabe, eine optimale Kommunikation innerhalb des Verbundvorhabens und mit den russischen Partnern bzw. den zuständigen Behörden in Deutschland und Russland, insbesondere der Republik Sacha, zu gewährleisten. Besondere Bedeutung kam dabei der Zusammenarbeit mit dem OSL und den OSL-Stipendiaten sowie den russischen Forschergruppen zu. Das Sekretariat bündelt die vielfältigen Koordinationsaufgaben und sichert länderübergreifend die thematische Vernetzung des Verbundvorhabens.

- Publikationen

Als ein besonderer Meilenstein ist die Publikation eines Sammelbandes zu den Ergebnissen des Verbundvorhabens „System Laptev-See“ in russischer Sprache im Verlag der Staatlichen Universität Moskau zu bewerten: Kassens, H., Lisitzin, A.P., Thiede, J., Polyakova, Ye.I., Timokhov, L.A., and Frolov, I.E. (eds.) (2009) System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern Environments and History of Development. Moscow: MSU Press, 608 pp. (in Russian). Der Band enthält insgesamt 25 wissenschaftliche Artikel sowie zusätzlich sieben Artikel zur aus „System Laptev-See“ hervorgegangenen bilateralen Forschungs- und Bildungslandschaft. Desweiteren wurde ein Sonderband über die Ergebnisse des Verbundvorhabens für die Zeitschrift „Polar Research“ vorbereitet. Der Band wird im Frühjahr 2011 erscheinen. Eine Gesamtliste der Publikationen der Projektmitarbeiter findet sich in Anhang A.

- Durchführung der drei Sommer- und zwei Winterexpeditionen

In enger Abstimmung mit dem AARI und dem russischen Ministerium für Bildung und Wissenschaft fanden alle Expeditionen wie geplant statt. Eingebunden in die dreimonatigen russischen IPY-Expeditionen „BARKALAV-2007“ und „BARKALAV-2008“ mit dem Forschungsschiff „Ivan Petrov“ wurden die Sommerexpeditionen TRANSDRIFT XII (22.8.-22.9.2007) und TRANSDRIFT XIV (5.-21.9.2008) erfolgreich durchgeführt. 2007 nahmen 25 Wissenschaftler von Forschungseinrichtungen in Bremen, Bremerhaven, Kiel, Moskau, St. Petersburg und Tiksi und 2008 vierzehn Wissenschaftler des AARI, AWI, IFM-GEOMAR,

Lena-Delta-Reservats und der Universität St. Petersburg (POMOR) teil. An der Sommerexpedition TRANSDRIFT XVI mit dem russischen Forschungsschiff „Yakov Smirnitsky“ (1.-20.9.2009) nahmen neun Wissenschaftler des AARI, IFM-GEOMAR und Lena-Delta-Reservats teil. Auch diese Expedition wurde erfolgreich abgeschlossen.

Während der Winterexpedition TRANSDRIFT XIII (6.4.-10.5.2008) diente die sibirische Stadt Tiksi als Basislager für die siebzehn Teilnehmer vom AARI, AWI, IFM-GEOMAR, Lena-Delta-Reservat, der Staatlichen Universität Moskau und der Universität Trier. An der Expedition nahm auch Konsul Karsten Eden vom Generalkonsulat in St. Petersburg teil. Im Jahr 2009 wurde die Winterexpedition TRANSDRIFT XV (15.3.-28.4.2009) erfolgreich durchgeführt. Die sibirische Stadt Tiksi war erneut Basislager für die zwanzig Teilnehmer vom AARI, AWI, IFM-GEOMAR, Lena-Delta-Reservat, dem State Hydrometeorological Department, der Staatlichen Universität Moskau und der Universität Trier. An dieser Expedition nahm auch der Minister für Justiz, Arbeit und Europa des Landes Schleswig-Holstein, Uwe Döring, teil. Durch die sehr gut abgestimmte Logistik und die Unterstützung durch die russische Luftwaffe mit zwei Helikoptern ist es gelungen, das geplante Arbeitsprogramm beider Winterexpeditionen erfolgreich durchzuführen. Ausführliche Darstellungen zu den einzelnen Ergebnissen finden sich in den Berichten der Teilprojekte 1A, 2, 3 und 4.

Die Fahrtberichte aller Expeditionen inklusive der Arbeitsbeschreibungen, Stationskarten und -listen sowie erster Ergebnisse finden sich in Anhang H, I und J.

- Durchführung bilateraler Arbeitstreffen

Zwei russisch-deutsche Arbeitstreffen wurden in Tiksi (16.-23.2.2008) und am IFM-GEOMAR in Kiel (25.-26.2.2008) durchgeführt. Zweck des internationalen Planungstreffens in Tiksi waren die Vorbereitung der Expedition TRANSDRIFT XIII. Das Arbeitstreffen in Kiel diente den Teilnehmern zur Darstellung ihrer Ergebnisse und zum Austausch mit den Partnern sowie mit den OSL-Stipendiaten.

Vom 23. bis 25.11.2009 wurde das 9. Arbeitstreffen am OSL/AARI in St. Petersburg durchgeführt. Zweck des Arbeitstreffens waren die Begutachtung des Verbundvorhabens sowie die Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse der vergangenen drei Jahre. Das Treffen fand im Rahmen einer wissenschaftlichen Tagungswoche in St. Petersburg statt (vgl. auch Anhang D „Ehrungen und Auszeichnungen der Projektmitarbeiter“). Weitere Konferenzen dieser Woche waren ein wissenschaftliches Symposium anlässlich des zehnjährigen Bestehens des OSL sowie das Arbeitstreffen „IMPETUS 2009: Overwintering and Scientific

Drilling in the Laptev Sea“ (s. Tagungsbeiträge in Anhang A).

- Durchführung von Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner

Im Jahr 2007 wurde das erste Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner (11.4.2007) am IFM-GEOMAR in Kiel durchgeführt. Im Mittelpunkt stand die logistische und wissenschaftliche Abstimmung zwischen den Teilprojekten sowie die Vorbereitung der Expedition TRANSDRIFT XII. Außerdem wurden zwei Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner am 8.2.2008 und am 25.11.2008 am IFM-GEOMAR organisiert. Im Mittelpunkt des Februar-Treffens standen die logistische und wissenschaftliche Abstimmung zwischen den Teilprojekten sowie die Vorbereitung der Winterexpedition TRANSDRIFT XIII. Das Treffen im November diente dem gegenseitigen Informationsaustausch und der gemeinsamen Planung und wissenschaftlichen Abstimmung der Expedition TRANSDRIFT XV. Im darauffolgenden Jahr wurden zwei Arbeitstreffen der deutschen Verbundpartner am 26.-27.2.2009 an der Universität Trier und am 22.9.2009 am IFM-GEOMAR organisiert. Im Mittelpunkt des Februar-Treffens standen die logistische und wissenschaftliche Abstimmung zwischen den Teilprojekten sowie die abschließende Vorbereitung der Expeditionen TRANSDRIFT XV und XVI. Das Treffen im September diente dem gegenseitigen Informationsaustausch und der gemeinsamen wissenschaftlichen Abstimmung der weiterführenden Auswertung der Projektergebnisse.

- Durchführung des 13. und das 14. bilateralen Arbeitstreffens

Gemeinsam mit dem OSL und dem Projektträger Jülich des BMBF wurden das 13. und das 14. bilaterale Arbeitstreffen im Rahmen der Fachvereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meeres- und Polarforschung zwischen dem Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland und dem Ministerium für Bildung und Wissenschaft der Russischen Föderation am AARI in St. Petersburg bzw. in der Station Wattenmeer des AWI auf Sylt organisiert.

- Betreuung von Gastwissenschaftlern

Im Jahr 2007 wurden neun, in den Jahren 2008 und 2009 je dreizehn und 2010 vier Gastaufenthalte von russischen Wissenschaftlern am Institut für Ozeanographie, Hamburg, und am IFM-GEOMAR organisiert (vgl. Anhang E). Die Gastwissenschaftler trugen durch ihre

Forschungsaufenthalte wesentlich zur Vorbereitung der Expeditionen und Auswertung der Ergebnisse bei.

- Koordination und Betreuung der russischen Forschergruppen

In allen Teilprojekten wurden die Forschungsarbeiten durch russische Forschergruppen (vgl. Anhang F) erfolgreich ergänzt. Im Jahr 2007 wurden drei Forschergruppen, 2008 fünf, 2009 sieben und 2010 sechs Forschergruppen betreut. Die Berichte der OSL-Forschergruppen über ihre Tätigkeiten finden sich im Anhang G.

- Durchführung von Korrekturen russischer, englischer und deutscher Manuskripte und Berichten

Das Sekretariat „System Laptev-See“ führte für die deutschen und russischen Verbundpartner Korrekturen russischer, englischer und deutscher Manuskripte und Berichte durch.

- Übersetzen und Dolmetschen

Eine wichtige Teilaufgabe des Koordinationsteams war das Übersetzen der Fahrtanträge für die Expeditionen, die gemeinsam mit den Koordinatoren des russischen Partnerprojektes „System Laptev-See“ an die zuständigen russischen Ministerien gestellt werden müssen. Diese Anträge müssen in russischer Sprache verfasst sein. Außerdem mussten für alle Expeditionen Verträge in deutscher und russischer Sprache abgeschlossen werden. Die Verträge wurden gemeinsam mit den russischen Partnern aufgesetzt und übersetzt.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 2: Reaktionen der Polynja-Systeme auf veränderte Antriebsgrößen

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Untersuchung der Auswirkungen des atmosphärischen und ozeanischen Antriebs auf die Eisbildung in der Laptev-See

Die atmosphärisch getriebenen thermodynamischen und dynamischen Eisbildungsprozesse in Laptev-See-Polynjen konnten erfolgreich mittels zweier Polynjamodelle (Polynja-Flux-Modell) simuliert werden. Polynja-Flux-Modelle beschreiben die zeitliche und räumliche Entwicklung von Polynjen durch die Berechnung des Gleichgewichtes zwischen der Neueisbildung in Zonen offenen Wassers und des Exports von konsolidiertem, dünnem Eis (Krumpen, subm.). Die Anwendbarkeit der Modelle wurde in (Krumpen, in press) getestet, dabei zeigten die Ergebnisse eine hohe Übereinstimmung zwischen simulierter Polynja-Dynamik (Entwicklung von offenem Wassers und Dünneiszonen) und den Satellitenbeobachtungen. Die modellierte Eisdickenverteilung entspricht der aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Verteilung (siehe Abb. 1). Der Modellantrieb erfolgte mittels atmosphärischer Daten, die von der Universität Trier (TP 4) bereitgestellt wurden.

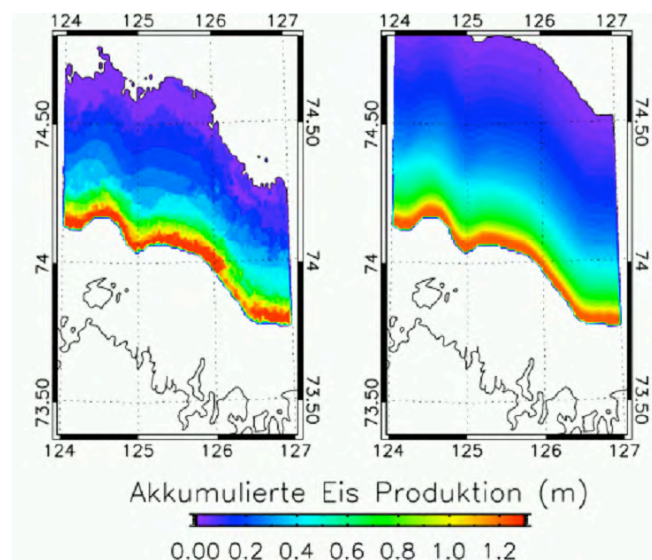


Abb. 1: Die Abbildung zeigt die modellierte und beobachtete akkumulierte Eisproduktion in der Anabar-Lena-Polynja über einen 11-tägigen Zeitraum (20.12. bis einschließlich 30.12.2007). Die Beobachtungen (rechts) basieren auf MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)-Satellitenbildern. Die Polynja-Simulation (links) wurde mittels eines Polynja-Flux-Modells erzeugt.

Die hohe Übereinstimmung von atmosphärisch angetriebenen Polynja-Modellsimulationen und Satelliten und Felddaten zeigt, dass die Prozesse, welche maßgeblich die Polynja-

Dynamik steuern, erfasst und im Modell implementiert wurden. Bisher war nicht deutlich, welche ozeanographischen Auswirkungen starke Eisbildungsprozesse in Polynjen nach sich ziehen können. Inwieweit sich thermales und dynamisches Eiswachstum in Polynjen auf die Schichtung des Wasserkörpers auswirkt, konnte jedoch in der abschließenden Projektphase geklärt werden und wird im Folgendem erörtert.

Während des Prozesses der Eisbildung werden Salze freigesetzt, welche den oberflächennahen Wasserschichten hinzugefügt werden. Falls die Eisbildung und der damit verbundene Salzfluss stark genug ist, kann dies zu einer kompletten Durchmischung des Wasserkörpers führen. Tritt eine vollständige Auflösung der Schichtung ein, wird – bei anhaltender starker Eisbildung – salzhaltiges Bodenwasser gebildet, welches im Weiteren beginnt, über den Schelfhang Richtung arktisches Becken abzufließen. Außerdem beeinflussen Durchmischungsprozesse in Polynjen den Stoff- und Energieaustausch zwischen tieferen Wasserschichten und der Oberfläche. Die Bedeutung der Polynjen für lokale Austauschprozesse ist bis dato weitgehend ungeklärt.

Für die Untersuchung des Einflusses von Eisbildung innerhalb von Polynjen auf den Wasserkörper findet das in Krumpen (in press) erfolgreich getesteten Flux-Modell Anwendung. Zuvor wurde das Modell jedoch um eine dynamische Komponente erweitert, da die Vernachlässigung von konvergenter Eisbewegung zu Ungenauigkeiten in der Eismassenabschätzung führen kann (Krumpen, in press).

Um den Einfluss von Neueisbildung im Bereich des offenen Wassers und des Dünneises auf die Schichtung (Stratifizierung) des Wasserkörpers zu testen, wurden Eis und Salzflüsse eines besonders starken Polynja-Ereignisses in der östlichen Laptev See simuliert (Abb. 2).

Das Öffnungsereignis dauerte vom 10. Februar bis einschließlich 6. März 2004 und war geprägt durch verhältnismäßig hohe Windgeschwindigkeiten und extrem niedrige Temperaturen. Das Zusammenspiel beider Faktoren fördert die Eisbildung. Die modellierte Eisdickenverteilung wurde verglichen mit thermalen MODIS-Eisdickenabschätzungen (bereitgestellt durch die Universität Trier). Satellit und Modell zeigen dabei eine hohe Übereinstimmung (Abb. 3).

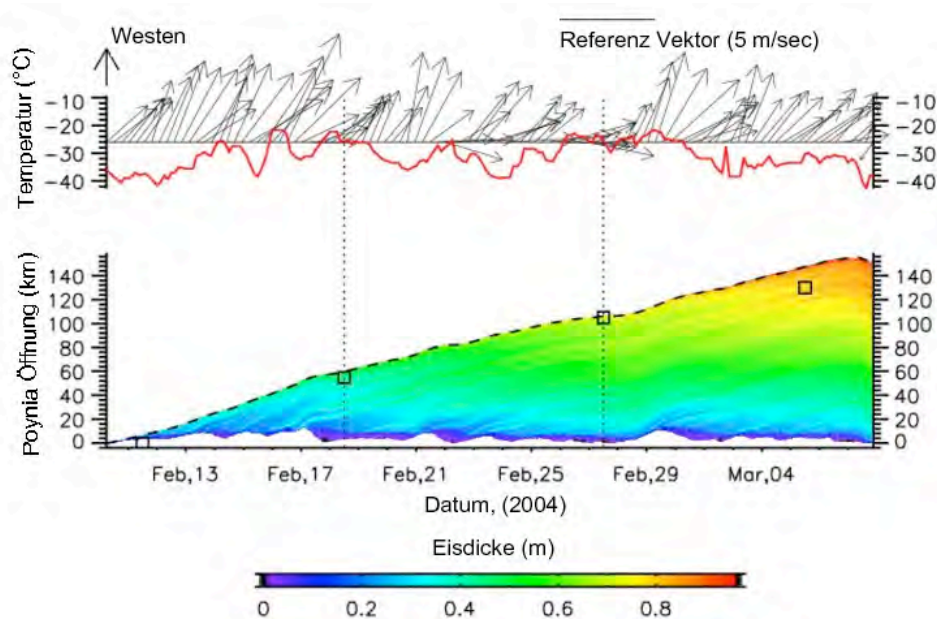


Abb. 2: Atmosphärischer Datensatz (NCEP/DOE) und Simulation des Polynja-Ereignisses 2004. Das obere Feld zeigt Lufttemperaturen in 2 m Höhe und Wind-Vektoren. Die Länge der Vektoren entspricht den Windgeschwindigkeiten. Der Pfeil deutet die Windrichtung an. Das untere Feld zeigt die modellierte (schwarze gestrichelte Linie) und beobachtete (schwarze Rechtecke) Gesamtbreite der Polynja. Die Farbe entspricht der Eisdicke in der Dünneiszone. Die weißen Flächen unterhalb der Dünneiszone zeigen die modellierte Entwicklung von offenem Wasser. Beobachtungen sind als schwarze Dreiecke dargestellt. Die vertikal aufgetragenen Linien entsprechen dem Datum der Referenzmessungen, die zur Modellvalidierung verwendet wurden (MODIS-Eisdicken: 18. und 27. Februar).

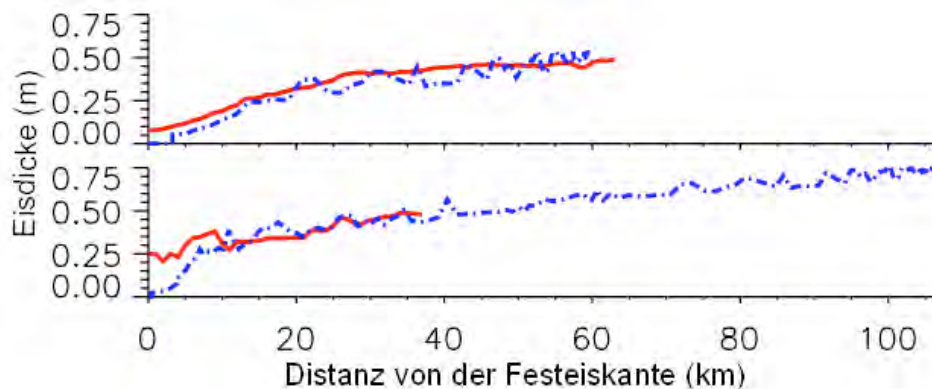


Abb. 3: Vergleich von thermalen Eisdicken abgeleitet aus MODIS-Satellitenbilddaten (durchgezogene Linie), aufgenommen am 18. (oben) und 27. (unten) Februar über der Polynja-Dünneiszone, mit modellierten Eisdicken (gestrichelte Linie). Offenes Wasser wird durch den Satelliten nicht oder nur bedingt erfasst.

Auf Basis berechneter Eisbildungsraten wurden die Salzflüsse bestimmt und über die Schichtung des Wasserkörpers integriert. Informationen über die wintertypische Schichtung wurden aus einem Langzeitdatensatz (1920 bis 2008) des AARI abgeleitet. Abbildung 4 zeigt die durchschnittliche Dichte- beziehungsweise Salzsichtung des Wasserkörpers im Winter. Die grau hinterlegten Felder zeigen den durch die Polynja-Aktivität verursachten Anstieg im

Salzgehalt des Wasserkörpers. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass trotz starker Eisbildungs-raten und des daran gekoppelten Salzeintrags eine Homogenisierung des Salzgehaltes im Wasserkörper ausbleibt. Eine eis- bzw. salzinduzierte Durchmischung erfolgt lediglich bis in eine Tiefe von maximal 15 m. Salzreiches Bodenwasser kann nicht gebildet werden. Grund hierfür ist insbesondere die starke Schichtung des Wasserkörpers, hervorgerufen durch den hohen Flusswassereintrag im Sommer. Wir folgern, dass konvergente (d.h. dichtegetriebene) Mischungsprozesse lediglich eine untergeordnete Rolle im Energie-, Stoff- und Salzaustausch im östlichen Schelfbereich spielen.

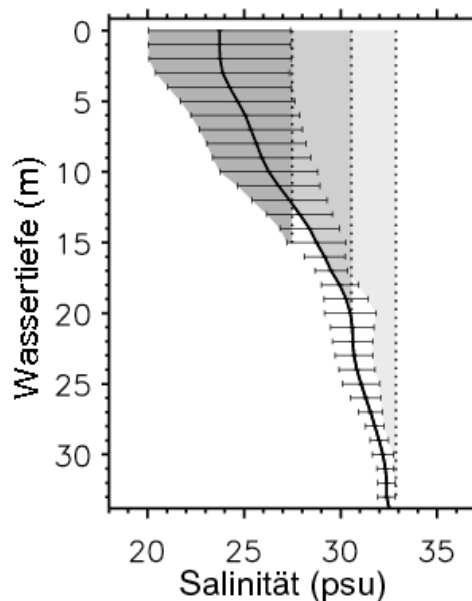


Abb. 4: Einfluss des Austritts von Salzlaugen („brines“) auf die Stratifizierung des Wasserkörpers. Der durchschnittliche Salzgehalt des Wasserkörpers vor dem Polynja-Ereignis ist durch die durchgezogene schwarze Linie gekennzeichnet. Die vertikalen Balken repräsentieren die Standardabweichung (STDV). Informationen über den durchschnittlichen Salzgehalt und die daran gekoppelte Dichteschichtung des Wasserkörpers im Winter wurden dem ozeanographischen Langzeitdatensatz des AARI entnommen. Die grau schattierten Felder zeigen den berechneten Anstieg im Salzgehalt für die drei „Stratifizierungsstärken“ (mittlere Stratifizierungsstärke abzüglich der STDV, dunkelgrau; mittlere Stratifizierungsstärke, mittelgrau, mittlere Stratifizierungsstärke zuzüglich der STDV, hellgrau).

Die Bedeutung der Meereisbedeckung und des küstennahen Festeises für die ozeanische Zirkulation sowie den Stoff- und Energietransport auf dem Laptev-See-Schelf

Aufgrund des frühen Rückgangs der Meereisbedeckung im Sommer 2007 stiegen die Wassertemperaturen in der Deckschicht der zentralen und östlichen Laptev-See auf Werte, die bis zu 5°C über dem langjährigen Mittel lagen (Feldmessungen im Rahmen der Expedition TRANSDRIFT XII). Messungen der Meeresbodenobservatorien, die im September 2007 im Bereich des mittleren Schelfs der Laptev-See verankert wurden, belegen, dass mit dem Ein-

setzen der Herbststürme in der zu diesem Zeitpunkt noch eisfreien Laptev-See eine Durchmischung der gesamten Wassersäule einsetzte. Dadurch stiegen auch die Bodenwassertemperaturen in 40 m Wassertiefe für mehrere Monate und zeigten Werte, die um 0,5 bis 0,7°C höher lagen als die sonst hier vorherrschenden kalten Bodenwassertemperaturen (Hoelemann et al., accepted) (Abb. 5). Gleichzeitig mit der Eisbildung zu Beginn des Winters kühlte auch das Bodenwasser sukzessive ab, um im April 2008 wieder typische kalte Temperaturen um -1,7°C zu erreichen. Die noch im Zwischenbericht 2008 vertretene Hypothese, dass die im Winter auftretende Erwärmung des Bodenwassers durch den Zustrom von wärmeren Wassermassen vom äußeren Schelf verursacht wurde, musste aufgrund der Strömungsdaten und der für diese Wassermassen um ~2 PSU zu geringen Salinität (bei -1°C) verworfen werden. Ob die erhöhten Wassertemperaturen die Eisbildung in den Polynjen der Laptev-See beeinflussten, konnte nicht eindeutig beantwortet werden, denn die Eisproduktion im Bereich der östlichen Laptev-See im Winter 2007/2008 zeigte anscheinend keine Anomalie (Willmes et al., in press).

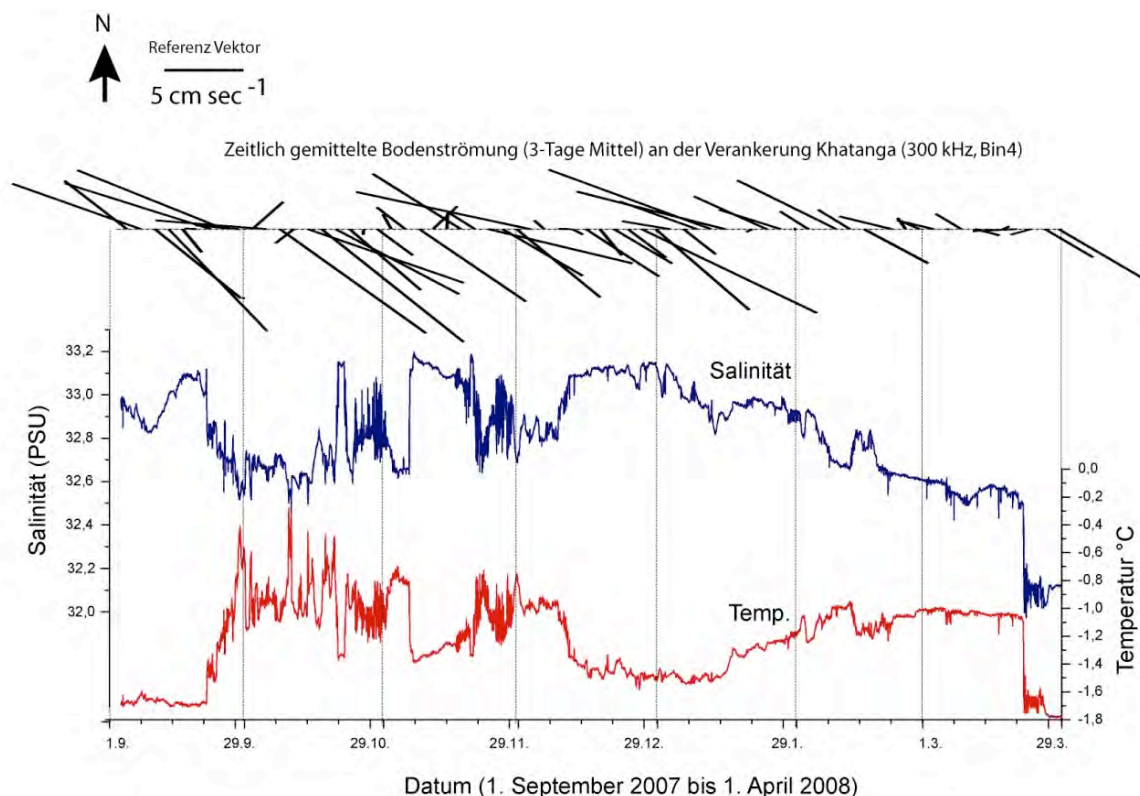


Abb. 5: Zeitlich gemittelte Bodenströmungen (~34 m) sowie Temperatur- und Salinitätsverlauf (~38 m Wassertiefe) vom 3.9.2007 bis zum 1.4.2008 am Meeresbodenobservatorium KHATANGA auf dem mittleren Schelf der Laptev-See (s. auch TP 1). Nach zwei Sturmereignissen Ende September und Anfang Oktober erwärmte sich das Bodenwasser auf Werte um -1°C. Strömungen aus NW bringen generell kälteres und salzigeres Bodenwasser in den Bereich des Observatoriums, während Phasen mit Strömungen aus SE wieder wärmeres Bodenwasser heranzuführen. Ein Polynja-Ereignis Ende März führte zu einer deutlichen Abnahme der Salinität und Temperatur im Bodenwasser.

Die Daten der Meeresbodenobservatorien zeigten auch ein in der Laptev-See bisher nicht beschriebenes Phänomen. Während der Öffnung der Polynjen kam es zu einer verstärkten turbulenten Durchmischung der Wassersäule. Weil trotz des Salzeintrages – in Folge der Eisbildung – die Salinitäten in der Deckschicht deutlich geringer waren als unterhalb der Dichtesprungschicht, kam es bei der Mischung beider Wasserkörper zu einer deutlichen Abnahme des Salzgehalts im Bodenwasser (Abb. 6). Dies steht im Widerspruch zu den bisherigen Beobachtungen, die darauf hindeuteten, dass in den Polynjen nur konvektive Prozesse auftreten. Inwieweit turbulente Mischungsprozesse im Bereich der Dichtesprungschicht den Stoff- und Energieaustausch zwischen dem Bodenwasser und der Deckschicht beeinflussen, ist in der Laptev-See bisher nur an wenigen Beispielen untersucht worden (Lenn et al., subm.). Diese Prozesse sind jedoch von besonderer Wichtigkeit, weil neben der Erwärmung des gesamten Wasserkörpers in Folge der Sonneneinstrahlung und der wärmeren Lufttemperaturen im Sommer, die vor allem auf dem inneren Schelf deutlich ausgeprägt sind, auch ein zunehmender Einfluss von atlantischem Zwischenwasser am Kontinentalhang der Laptev-See zu einem Anstieg der Bodenwassertemperaturen auf dem Schelf führen kann (Dmitrenko et al., 2010; Polyakov et al., subm.). Ein anschließender erhöhter Wärmefluss aus dem Bodenwasser an die Oberfläche könnte dann zu einer Abnahme der Meereisbedeckung bzw. -dicke in der nördlichen Laptev-See führen. Dieser Prozess wurde zwar in Veröffentlichungen bereits postuliert (Holloway & Proshutinsky, 2007 und Zitate darin), konnte aber durch Beobachtungen aus der Laptev-See bisher nicht belegt werden.

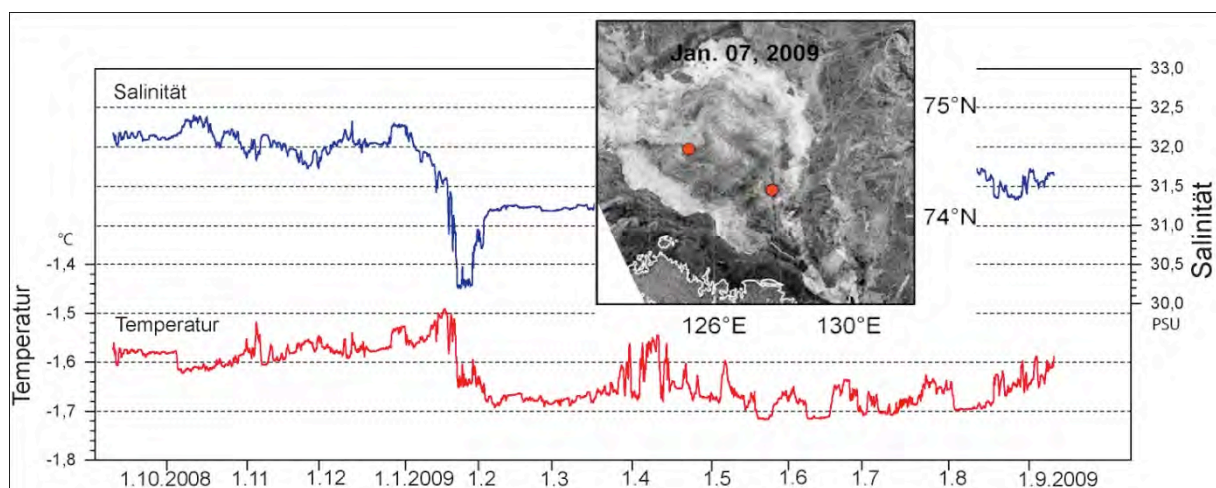


Abb. 6: Temperatur und Salzgehalt im Bodenwasser (KHATANGA) während eines starken Polynja-Ereignisses im Dezember/Januar 2008/2009. Die roten Punkte markieren die Lage der Meeresbodenobservatorien KHATANGA (im Westen) und ANABAR (im Osten). In der ersten Januarwoche hatte die Polynja eine Ausdehnung von etwa 150 x 150 km.

Im Verbundvorhaben wurde in enger Zusammenarbeit mit der NAOSIM (North Atlantic –

Arctic Ocean – Sea-Ice Model)-Modellierungsgruppe am AWI und dem TP 4 die Festeiskante in der Laptev-See in das NAOSIM-Modell integriert (Abb. 7) (Rozman et al., accepted). Dies führte zu einer wesentlich realistischeren Modellsimulation der Polynjen und Meereiskonzentration, während das generelle Eisdriftmuster in der Laptev-See weniger durch den Festeisgürtel beeinflusst wird. Die Ergebnisse der Modellläufe mit Integration des Festeises deuten jedoch darauf hin, dass auch die Dichteschichtung des Wasserkörpers im Winter und die Strömung in der südlichen Laptev-See vom Festeis beeinflusst werden (Abb. 8).

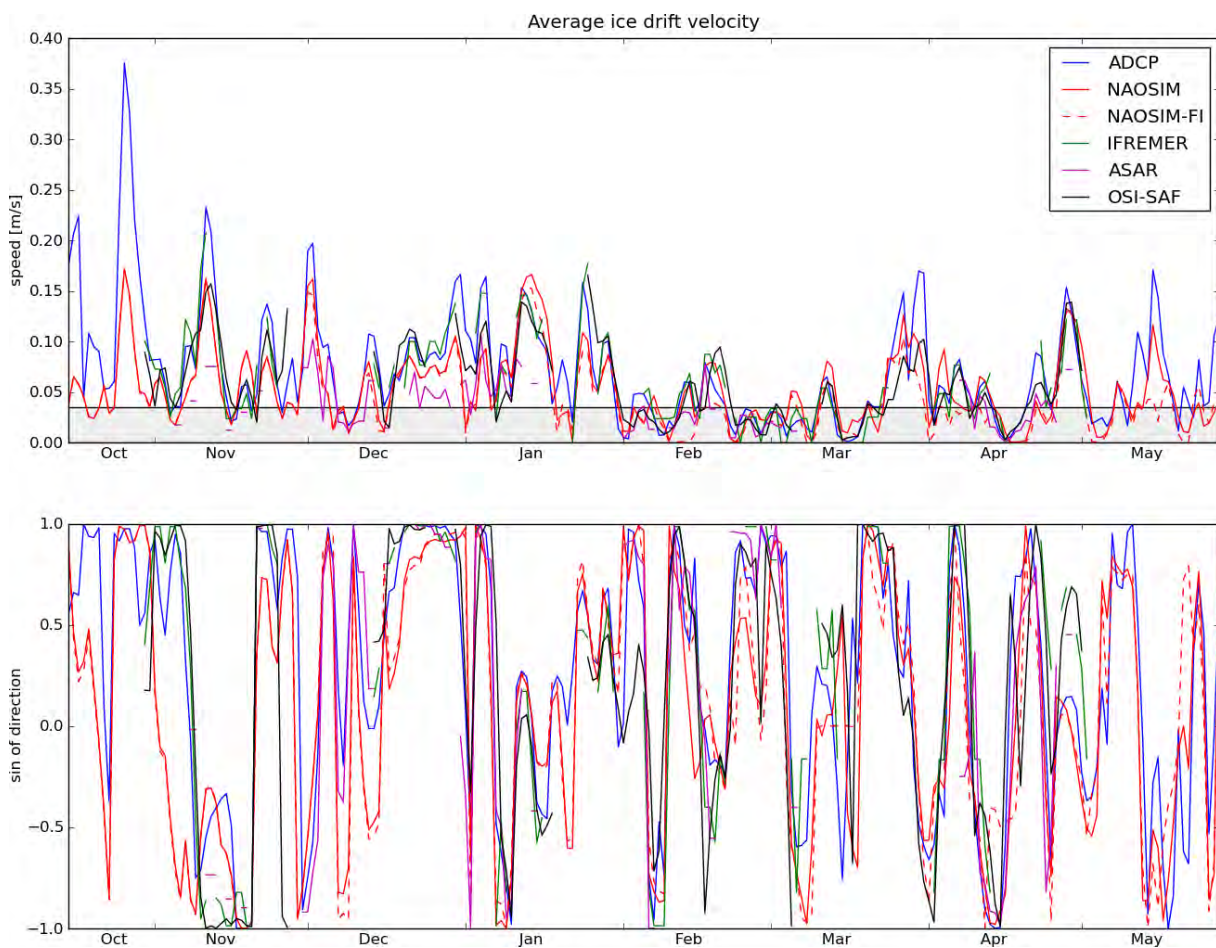


Abb. 7: Vergleich der simulierten Meereisdriftgeschwindigkeit (oben) und Driftrichtung (unten) mit Fernerkundungsdaten (IFREMER, ASAR, OSI-SAF) und Messungen der Meeresobservatorien (KHATANGA: 15.10.200 bis 15.5.2008). Für die Simulation wurden NAOSIM-Modellläufe ohne Integration des Festeises (durchgezogene rote Linie) und mit Integration des Festeises (gestrichelte rote Linie) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell alle bedeutenden „Driftereignisse“ gut beschreibt, jedoch besonders hohe Driftgeschwindigkeiten (Daten der Meeresobservatorien) unterschätzt (Rozman et al., accepted).

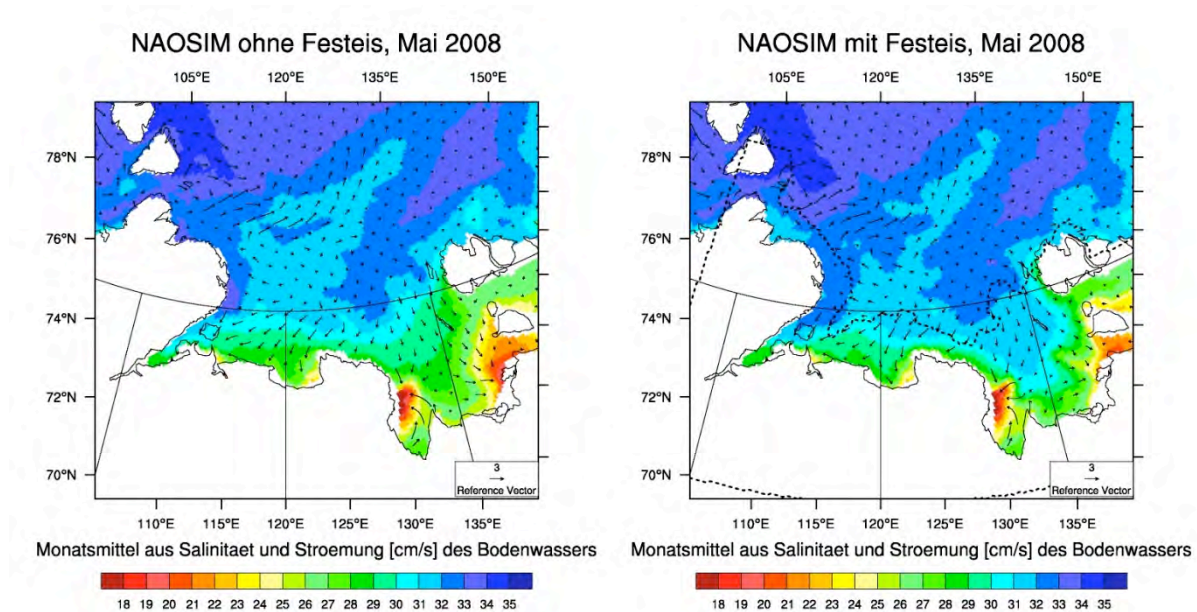


Abb. 8: Monatliches Mittel der Salinität und der Strömungen in einer Wassertiefe von 20 bis 30 m (Laptev-See, Mai 2008). Die linke Abbildung zeigt die Ergebnisse des Modelllaufs ohne Integration der Festeiskante, das rechte Bild die Ergebnisse mit Festeiskante. Die Integration der Festeiskante führte in der südöstlichen Laptev-See zu einem Anstieg des Salzgehaltes um 2 PSU. Darüber hinaus zeigte das Strömungsmuster generell eine ausgeprägtere ästuarine Zirkulation auf dem inneren Schelf.

In Zukunft soll die vertikale und horizontale Auflösung des Modells im Bereich der Schelfe verbessert und eine detaillierte Schelfbathymetrie in das Modell integriert werden.

Durch die geringer ausgeprägte Dichteschichtung und die generell höheren Salinitäten in der westlichen Laptev-See (Churun & Timokhov, 1995; Pivovarov et al., 2005) kommt es dort im Spätsommer regional zu einer vollständigen Durchmischung der Wassersäule. Der Salzgehalt der im Westen gebildeten Wassermassen ist höher als die Salinität der Deckschicht in der östlichen Laptev-See, so dass die Wassermassen der westlichen Laptev-See durch den wind- und gezeitengetriebenen advektiven Transport unter die Deckschicht im Osten abtauchen und dort das Bodenwasser bilden können. Belegt wurde dieser Prozess durch meereschemische und ozeanographische Messungen während der Sommerexpeditionen im Bereich der ozeanischen Fronten der zentralen Laptev-See (in Zusammenarbeit mit TP 3 und den OSL-Forschergruppen). Der gleiche Mechanismus führt im Bereich der Flusswasserfahne südöstlich des Lena-Deltas zur Ausbildung einer warmen Wasserschicht unterhalb der Deckschicht (Bauch et al., 2009b). Durch die generell höheren Salzgehalte in der nordwestlichen Laptev-See kann es hier durch Polynjaprozesse zur Bildung von kalten und salzigen Wassermassen kommen, deren Dichte so hoch ist, dass sie einen Einfluss auf die arktische

Halokline nördlich der Laptev-See haben könnten (Ivanov & Golovin, 2007; Lenn et al., 2009).

Die Ergebnisse der meereschemischen Arbeiten der OSL-Forscherguppe unterstützen auch die Hypothese, dass die Mischungsprozesse in der östlichen Laptev-See durch den hohen Flusseintrag und die damit einhergehende starke Salzsichtung des Wasserkörpers deutlich beeinflusst werden. Das im September 2007 durchgeführte, ca. 400 km lange N-S Profil, das die ozeanographischen und meereschemischen Bedingungen vom Lena-Delta bis zur Schelfkante erfasst (Abb. 9), zeigt, dass nur im Bereich des inneren Schelfs (Wassertiefen <20 m) die Wassersäule durchmischt ist. Im Bereich der Flusswasserfahne im mittleren Schelf (20-40 m Wassertiefe) wird die turbulente Durchmischung durch die starke Dichteschichtung beeinträchtigt, und es kommt zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration im bodennahen Wasserkörper. Der hohe Gehalt an Makronährstoffen (z. B. gelöstem Silikat) im bodennahen Wasserkörper deutet darauf hin, dass in diesem Gebiet, in dem sich im Winter auch die Polynja öffnet, die mikrobielle Zersetzung und Remineralisation des organischen Materials die Ursache für die Sauerstoffzehrung bildet. Da das Flusswasser der Lena hohe Konzentrationen an gelösten Silikaten, aber sehr geringe Konzentrationen an gelösten Stickstoffkomponenten und Phosphaten enthält, bildet der Nährstoffeintrag über die Remineralisation im Bodenwasser möglicherweise eine wichtige Quelle für die biologische Primärproduktion. Die Daten der Meeresbodenobservatorien zeigen, dass es im Winter während großräumiger Polynjaöffnungen zu einer episodischen Durchmischung der Wassersäule und somit vermutlich auch zu einem Transport von Makronährstoffen aus der Bodenschicht in die biologisch produktive Deckschicht kommt. Durch diesen Prozess stehen dem Plankton zu Beginn der Frühlingsblüte im Bereich der Polynja die notwendigen Nährstoffe zur Verfügung. Wir vermuten daher, dass die Polynja-Aktivität in der südöstlichen Laptev-See auch einen steuernden Einfluss auf die Primärproduktion im Frühling hat.

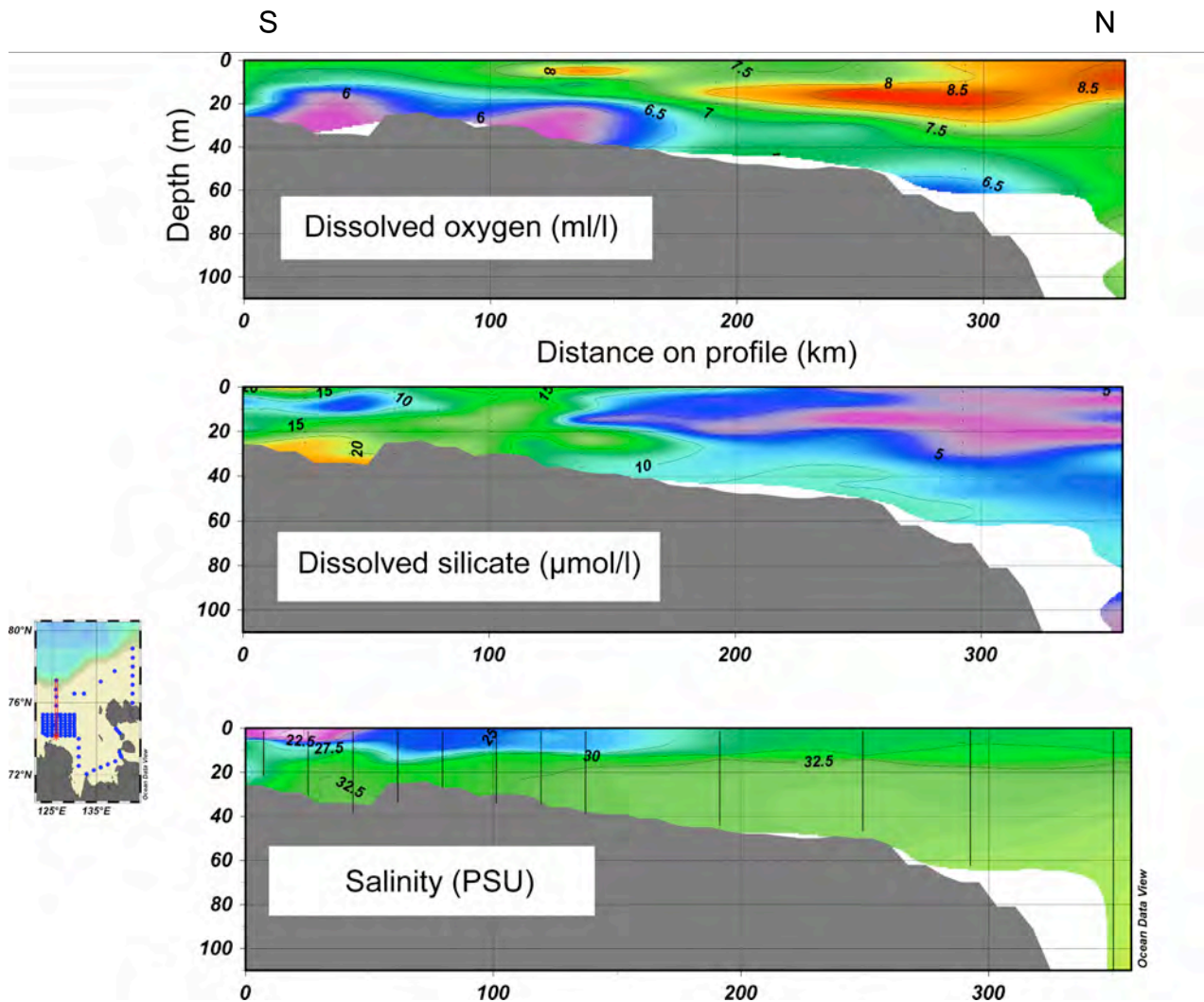


Abb. 9: Profil der Sauerstoffkonzentration, der Konzentration an gelöstem Silikat und der Salinität, aufgenommen im September 2007 (TRANSDRIFT XII) entlang des 124. Längengrades (östliche Länge). Die geringe Sauerstoff- und hohe Silikatkonzentration im Bodenwasser unterhalb der Flusswasserfahne deutet auf eine geringe Durchmischung der Wassersäule bei gleichzeitig starkem Abbau von organischem Material hin. Durch diesen Prozess kommt es zu einer Anreicherung von gelösten Makronährstoffen (Silikat, Phosphat, Nitrat und Nitrit) im Bodenwasser. Durch turbulente Mischungsprozesse während Polynjaöffnungen können diese Nährstoffe auch in die biologisch produktivere Deckschicht gelangen und eine wichtige Nährstoffquelle für die Planktonblüte im Frühjahr bilden.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Auf der Grundlage der durchgeführten Studien werden vor allem Fernerkundungsdaten und Atmosphären/Eis/Ozean-Modelle überprüft und verbessert, um so genauere Prognosen über die Auswirkungen der sich ändernden Meereisbedeckung im Bereich der sibirischen Schelfmeere treffen zu können. Die Ergebnisse der Arbeiten des Teilprojektes sind auch von direkter Bedeutung für die im arktischen Schelfbereich angesiedelte Industrie (Erfassung von Gefährdungspotentialen für den Pipelinebau, Risikoabschätzung für Offshore-Anlagen) sowie

für die Nutzung der Polynjasysteme als Schifffahrtsweg (Nordostpassage, Entwicklung der Hafeninfrastruktur in Sibirien etc.).

In Kooperation mit der Universität Trier konnte gezeigt werden, dass Eisabschätzungen mittels passiver Radardaten die Dünneisdicken und Eisproduktionsraten unterschätzen. Grund hierfür ist die grobe räumliche Auflösung gängiger passiver Mikrowellensensoren. Eine Alternative zum passiven Radar stellen thermale Satellitenbeobachtungen dar. Jedoch wird ihre Anwendbarkeit durch die Anwesenheit von Wolken stark eingeschränkt. Das Ergebnis der Studie verdeutlicht den Bedarf an hochauflösenden Satellitensystemen, welche für Eisbeobachtungen entlang der Nordostpassage eingesetzt werden können. Die bisherigen Arbeiten bilden damit auch eine wichtige Grundlage für die Planung zukünftiger Fernerkundungsmissionen. Satellitengestützte interferometrische Systeme, wie die kürzlich erfolgreich angelaufene TANDEM-X-Mission, werden zukünftig neue Möglichkeiten der Eisdickenbestimmungen in arktischen Randmeeren bieten. Anhand zweier versetzt fliegender hochauflösender Radar Sensoren (X-Band), kann das Freibord mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden.

Die Anfang 2010 gestartete Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS)-ESA-Mission soll großflächige Informationen über die Dicke einjährigen Eises liefern. Die Genauigkeit der entwickelten Methodik ist jedoch noch unbekannt. Daher sollen Eisdickeninformationen, die in der Laptev-See gewonnen wurden, bei der Planung von zukünftigen Messkampagnen zur Validierung der SMOS-Algorithmen genutzt werden.

Manuskripte, die die ersten Ergebnisse der Untersuchungen beschreiben wurden, bei Fachzeitschriften eingereicht (zum Teil bereits akzeptiert) und auf Tagungen präsentiert.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

TP 3: Isotopengeochemische Signaturen – Wassermassenbildung für den Arktischen Ozean

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Unsere Ergebnisse aus dem zum 31.3.2010 abgeschlossenen Projektes stammen aus dem auch in der Laptev-See klimatisch extremen Sommer 2007 und den Datensätzen aus dem nachfolgenden Sommer 2008 und den Wintern 2008 (April) und 2009 (April).

Ergebnisse aus dem klimatisch extremen Sommer 2007

Die Daten des klimatisch extremen Sommers 2007 zeigen in der Verteilung der Meereisbildung ungewöhnliche Ergebnisse.

Der Einfluss der Meereisbildung auf die sommerliche Hydrologie zeigt für den Sommer 2007 eine grundsätzlich gegenläufige Verteilung in der Wassersäule im Vergleich zu früheren Untersuchungen im Sommer 1994 (s. Abb. 1): Während der größte Einfluss der Meereisbildung (negative Meereisschmelzwasserwerte) vor 2007 im Bodenwasser zu finden war (vgl. Abb. 2 und 3), ist im Sommer 2007 der größte Einfluss der Meereisbildung in der oberflächennahen Schicht zu finden. Da die atmosphärischen Randbedingungen in den Sommern 2007 und 1994 ähnlich waren, müssen wir von einer unterschiedlichen Eisbildung und veränderten Advektionsraten im Winter 2006/2007 ausgehen (Bauch et al., subm.).

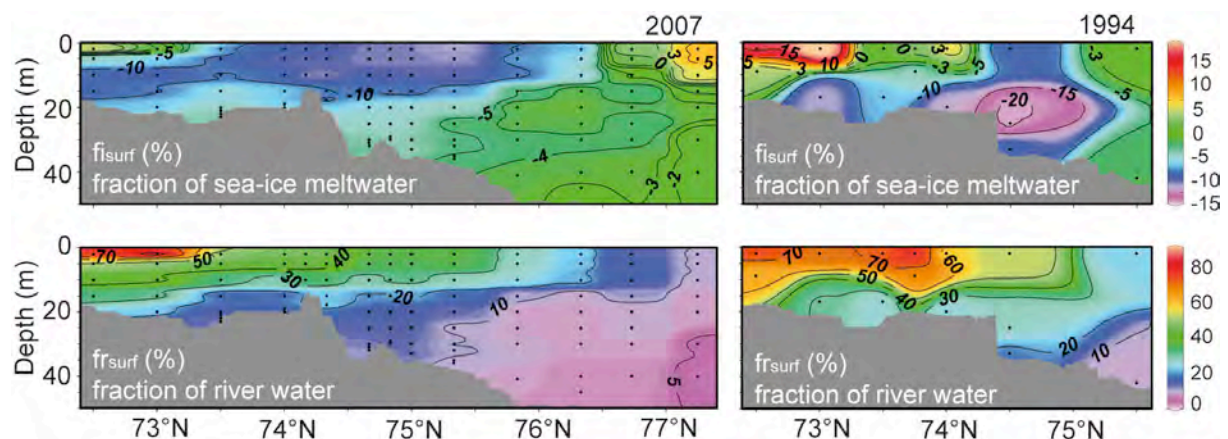


Abb. 1: Vergleich der aus Salzgehalt und $\delta^{18}\text{O}$ Werten berechneten Süßwasserverteilungen zwischen den Jahren 2007 (links) und 1994 (rechts). Die Verteilung der Anteile des Flusswassers und des Meereisschmelzwassers (negative Werte entsprechen Eisbildung) in der Wassersäule entlang einer Schnittes bei etwa 130°E.

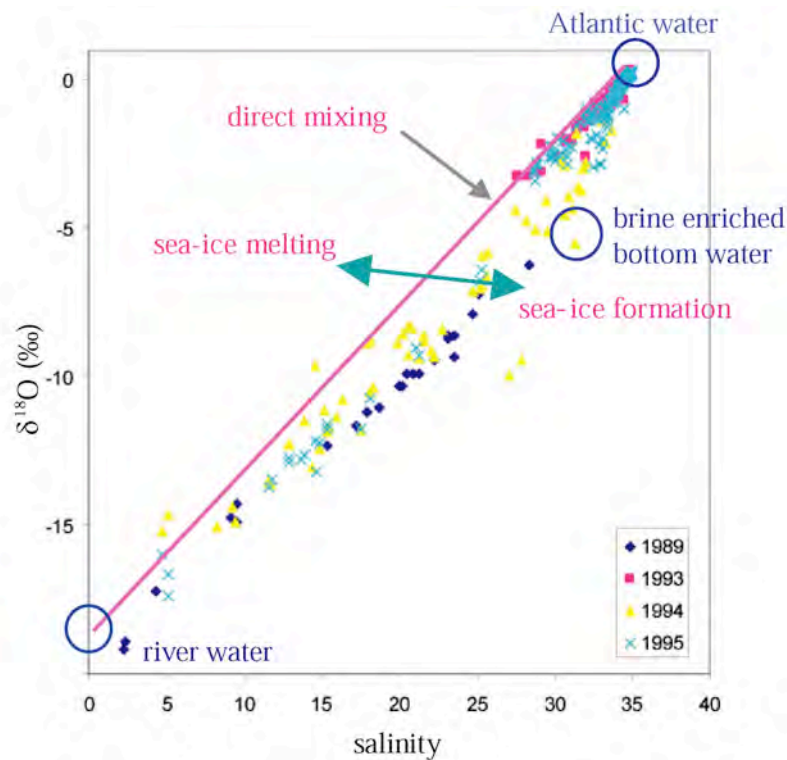


Abb. 2: $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalt für Daten aus der Laptev-See und vom angrenzenden Kontinentalhang. Daten stammen aus den Sommern 1989 (innerer Laptev-See-Schelf; Letolle et al., 1993), 1993 (Laptev-See-Kontinentalhang; Frank, 1996), 1994 (Laptev-See-Schelf; Mueller-Lupp et al., 2003) und 1995 (Laptev-See-Kontinentalhang; Frank, 1996). Die Abbildung stammt aus Bauch et al. (in press).

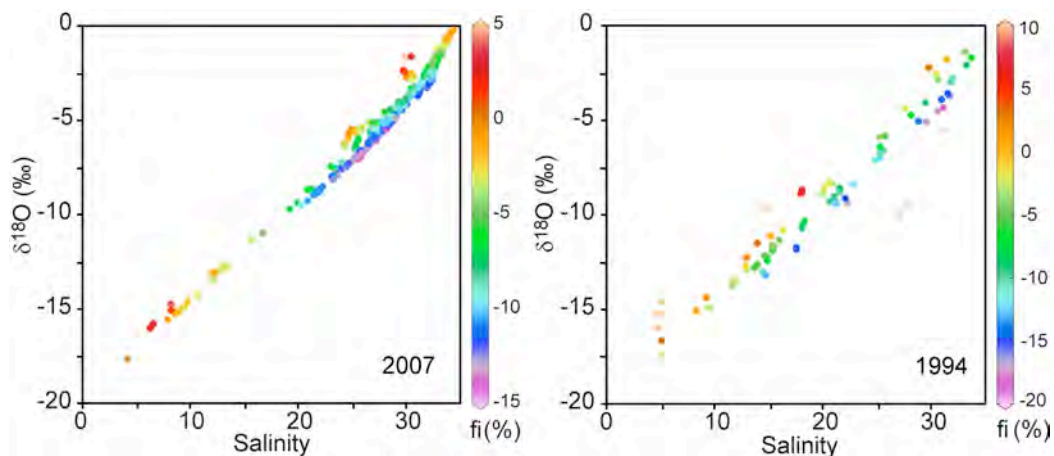


Abb. 3: $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalt für Daten aus der Laptev-See aus den Sommern 1994 (rechte Seite) und 2007 (linke Seite). Die farbliche Markierung der aufgetragenen Punkte kennzeichnet den berechneten Anteil des Meereisschmelzwassers (fi) in der jeweiligen Probe.

Die Rolle der Meereisbildung in der sommerlichen Hydrologie war in den beiden Jahren völlig verschieden: Im Sommer 1994 waren die mit Salzlaken („brines“) angereicherten Bodenwassermassen das Mischungsendglied zwischen höhersalinen Bodenwässern vom

äußeren Schelfrand und niedrigrsalinen inneren Schelfwassermassen und dominierten somit die Hydrologie der Laptev-See (s. Abb. 3 und vgl. auch Abb. 2). Dieses mit Salzlaken angereicherte Bodenwasser wurde in der Halokline des Arktischen Ozeans exportiert (Bauch et al., 2009a). Im Sommer 2007 dagegen schichteten sich die mit Salzlaken angereicherten Wassermassen in die Oberflächenschichtung der Laptev-See ein, und das dominierende Mischungsendglied zwischen inneren und äußeren Schelfwassermassen wurde durch einen relativ hochsalinen Wasserkörper ersetzt (Abb. 3), der vermutlich aus der westlichen Laptev-See advektiert wurde. Der Mechanismus, der zu dieser veränderten Eisbildung und Advektion führte, ist nicht verstanden; ebenso sind die Auswirkungen auf den Export von Schelfwassermassen aus der Laptev-See (Bauch et al., 2009a) nicht bekannt.

Ergebnisse der ersten Winterdatensätze

Die ersten Winterdaten mit Ergebnissen aus stabilen Sauerstoffisotopen konnten während der Winterexpedition TRANSDRIFT XIII im April/Anfang Mai 2008 erhoben werden. Die Korrelation zwischen Salzgehalten und $\delta^{18}\text{O}$ zeigt ebenso wie in den Sommerdatensätzen 2007 und 1994 eine klare Unterteilung in zwei Mischungslinien, welche durch Mischung von drei Endgliedern bestimmt wird (Abb. 4). Das marine Endglied mit relativ hohen Salzgehalten vom äußeren Schelf und das Süßwasser-Endglied auf dem inneren Schelf mischen sich jeweils mit einer lokal gebildeten Wassermasse, welche das dritte Mischungsendglied darstellt. Die Winterdaten zeigen, dass dieses lokale Endglied durch die Eisbildung in der Polynja der östlichen Laptev-See geprägt ist.

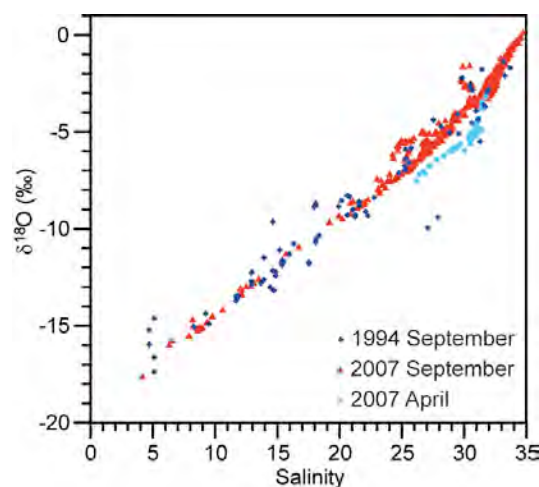


Abb. 4: Vergleich von $\delta^{18}\text{O}$ und Salzgehalt für Daten aus der Laptev-See für den Winterdatensatz von April/Anfang Mai 2008 (türkisblaue Kästchen), den Sommer 2007 (rote Dreiecke) und den Sommer 1994 (dunkelblaue Diamanten).

Im zeitlichen Verlauf der Winterexpedition wurden sowohl eine vertikale Mischung der Wassersäule als auch ein windgetriebener Einstrom von salinen bodennahen Wassermassen beobachtet. Zu Beginn unserer Messkampagne war diese einströmende saline Wassermasse relativ kalt (Abb. 5, obere Reihe). Sichtbar ist der kalte saline Einstrom nicht nur in der Salzgehalt/Temperatur-Relation (rechtes Panel) sondern auch deutlich in der veränderten Steigung im Salzgehalt/ $\delta^{18}\text{O}$ -Mischungsschema zu sehen (mittleres Panel). Nach einer Phase direkter Polynja-Aktivität mit Durchmischung der Wassersäule kam es erneut zu einem Einstrom von salinem Bodenwasser, welches nun aber einen anderen Ursprung hatte und relativ warm war (Abb. 5, untere Reihe, linkes Panel). Die isotopische Signatur von beiden einströmenden Bodenwassermassen ist nicht unterscheidbar. Beide Wasserkörper fallen exakt auf dieselbe Mischungslinie (mittlere Panels) und zeigen beide relativ geringe Anteile an Salzlaken und Flusswasser (rechte Panels). Daraus kann geschlossen werden, dass beide Wasserkörper nicht lokalen Ursprungs sind und vom äußeren Schelf stammen müssen. Aufgrund der isotopisch identischen Signatur kann darüber spekuliert werden, ob beide Wasserkörper auch einen identischen Ursprung, jedoch unterschiedliche Verläufe in der Modifizierung auf dem Schelf genommen haben.

In der Phase der Polynja-Aktivität (Abb. 5, mittlere Reihe) wurde an den jeweiligen Stationen ein Salzgehalt- und $\delta^{18}\text{O}$ -Wert beobachtet, der auch durch die Mischungslinien der einströmenden hoch- und niedrigrsalinen Wasserkörper gut definiert ist (mittleres Panel). Dies bedeutet, dass die gebildeten Polynja-Wassermassen erstaunlich gut definiert sind. Die ebenfalls gut definierten Mischungslinien zeigen, dass diese Werte im zeitlichen und räumlichen Verlauf keine stark schwankenden und stark lokal geprägten Werte aufweisen können. Aufgrund der noch unzureichenden Datenlage ist eine generelle Schlussfolgerung noch schwierig und bedarf einer weiteren Auswertung, die in Zusammenhang mit den längeren Zeitreihen der Meeresbodenobservatorien und den Daten des darauffolgenden Sommers erfolgen soll. Die berechneten Anteile von durch Meereisbildung zugesetzten Salzlaken waren während der Polynja-Aktivität deutlich erhöht, obwohl das Bodenwasser durch die Zumischung von niedrigrsalinem Oberflächenwasser mit relativ hohem Flusswasseranteil insgesamt weniger salzreich war (Abb. 5, mittlere Reihe und rechtes Panel).

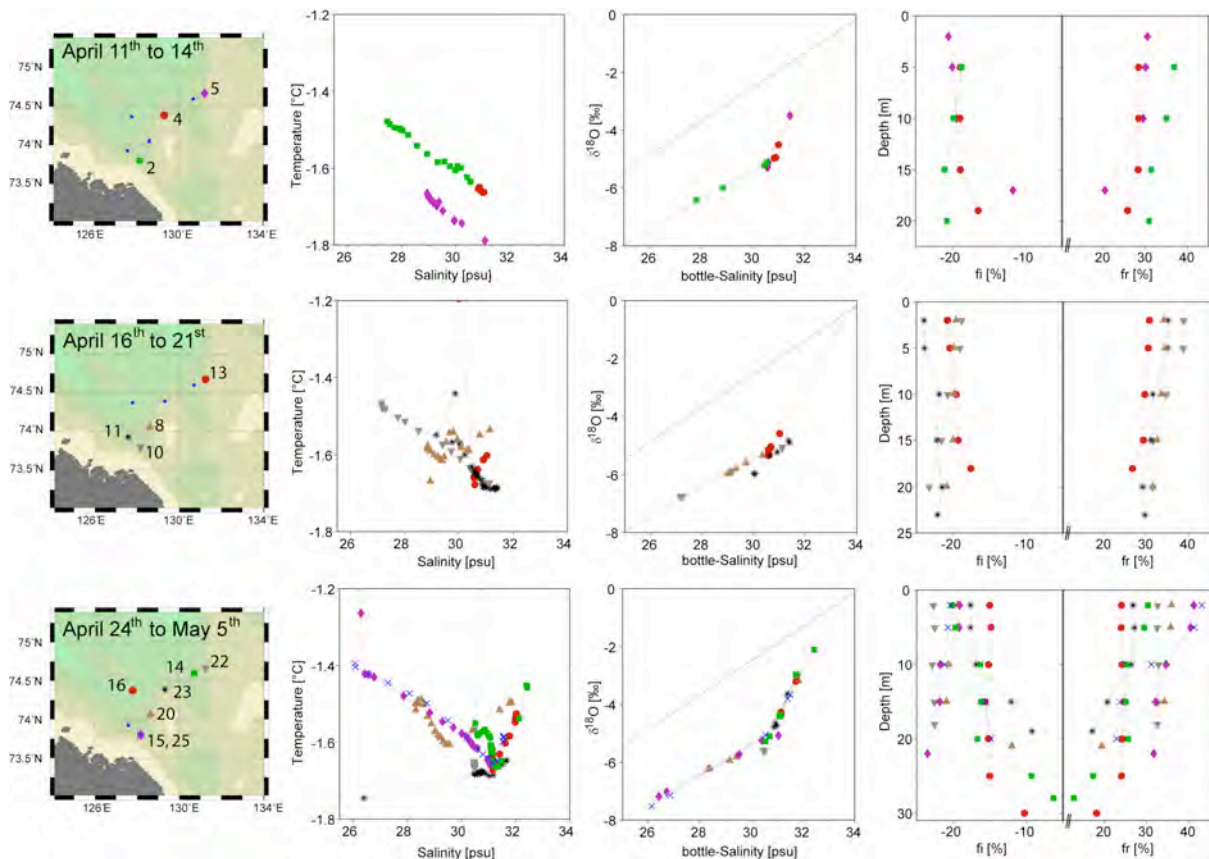


Abb. 5: Zeitlich gegliederte Stationsdaten von TRANSDRIFT XIII vom Rand der Polynja in der südöstlichen Laptev-See im Spätwinter 2008. Obere Reihe: 11.-14. April; mittlere Reihe: 16.-21. April; untere Reihe: 21. April-5. Mai. Neben der Stationskarte mit der Lage der jeweils abgebildeten Stationen sind im linken Panel Temperaturdaten gegen Salzgehalte dargestellt, im mittleren Panel $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalte und im rechten Panel die berechneten Anteile von Flusswasser und Meereisschmelzwasser.

Die im Winter (April) 2009 beobachtete hydrographische Situation stellt sich deutlich unterschiedlich relativ zur Situation im Winter 2008 dar: Zwar zeigen die im April 2008 erhobenen Daten signifikante Unterschiede innerhalb der unterschiedlichen Entwicklung der der Polynja-Aktivität (vgl. Abb. 5), jedoch ergeben die Daten zusammengenommen ein einheitliches Bild und können als Mischung zwischen drei Endgliedern verstanden werden (Abb. 6). Die im Winter (April) 2009 erhobenen Stationsdaten fügen sich jedoch zu keinem einheitlichen Mischungsschema zusammen. Diese hydrographischen Unterschiede kommen durch veränderte Advektionsmuster und durch veränderte Polynja-Aktivitäten über den Verlauf des jeweiligen Winters zustande und sind vermutlich auch auf dem Hintergrund der klimatisch extremen Situation im Sommer 2007 zu verstehen. Eine genauere Interpretation muss durch weitere detaillierte Auswertungen und Studien geklärt werden.

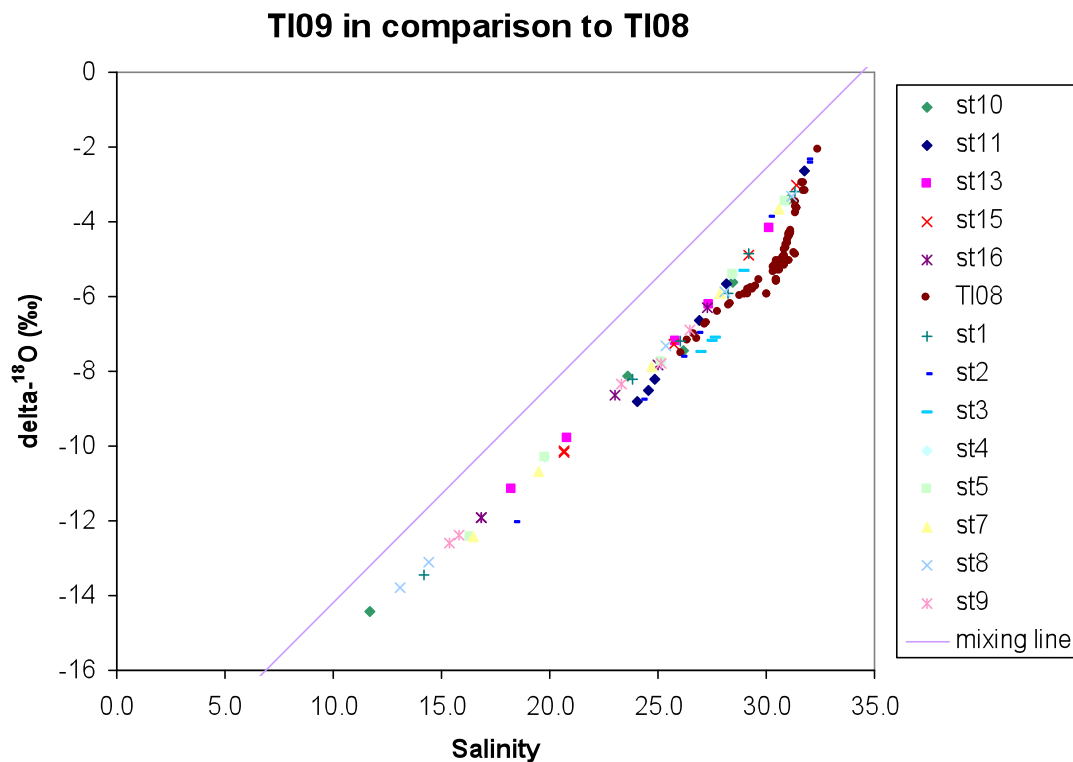


Abb. 6: $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalt für Winter-Daten vom Rand der Polynja in der südöstlichen Laptev-See aus den Jahren 2008 und 2009. Die Stationsdaten von TRANSDRIFT XIII (TI08) sind einheitlich dargestellt (dunkelrote Punkte). Die Stationsdaten von TRANSDRIFT XV (TI09) sind für jede Station mit unterschiedlichen Symbolen dargestellt.

Die Sommersituation 2008 als Modifikation des klimatischen Extrems von 2007

Die hydrographische Situation im Sommer 2008 ist unterfüttert durch die Datensätze vom April 2008 und vom Sommer 2007. Somit kann der Sommerdatensatz 2008 als Modifikation der Sommersituation 2007 verstanden und interpretiert werden.

Ein Vergleich der Oberflächen- und Bodenverteilungen der Salzgehalte im Sommer 2007 und 2008 (Abb. 7) belegt eine deutlich unterschiedliche Ausbreitung des Süßwasserausstroms der Lena. Im Sommer 2007 zeigen sowohl Oberflächen- wie auch Bodensalzgehalte, dass die Flusswasserfahne der Lena im Süden bleibt und nach Osten abgelenkt wird. Im Sommer 2008 breitet sich das Süßwasser der Lena in nördliche Richtung über den Laptev-See-Schelf aus.

Die Auswertungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in Zusammenhang mit den Salzgehalten und den daraus berechneten Meereisschmelzwasser-Anteilen zeigen, dass die Sommersituation 2008 trotz der starken Polynja-Aktivität im April 2008 keine grundsätzliche Veränderung in den Bodenwassercharakteristika zeigt.

2007

2008

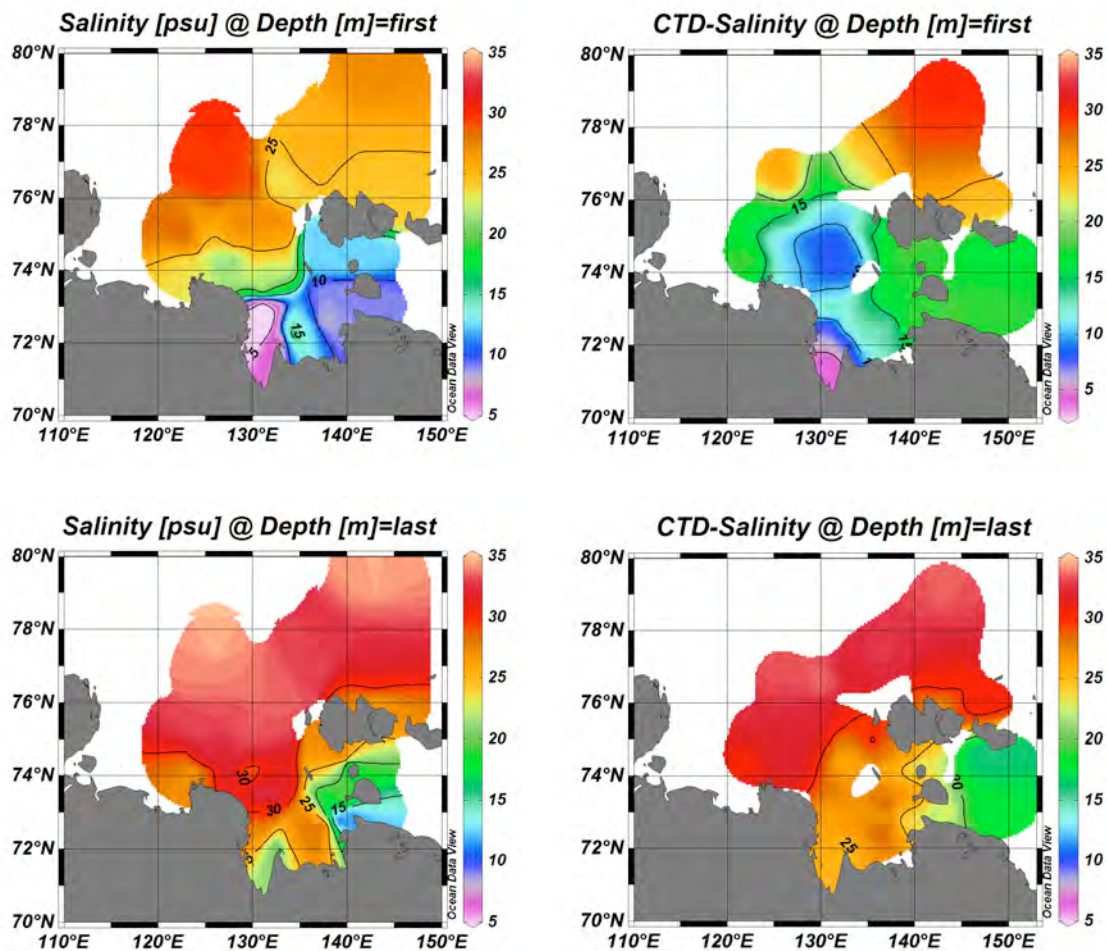


Abb. 7: Vergleich der Salzgehalte in der Oberfläche (obere Reihe) und am Boden (untere Reihe) zwischen den Jahren 2007 (links) und 2008 (rechts).

Die maximalen Werte der Brines (negative Werte im Meereisschmelzwasser) im Sommer 2008 ist etwas höher als 2007 und ihre Verteilung in der Wassersäule verändert. Die maximalen Werte der Brines liegen 2008 bei mittleren Tiefen, während die Brines 2007 an der Oberfläche zu finden waren (Abb. 8). Jedoch lässt sich diese am stärksten herausragende Veränderung vor allem auf die unterschiedliche Verteilung der Flusswasserfahne zurückführen und ist somit primär durch eine Überlagerung mit einer Süßwasserschicht erklärbar und nicht durch Eisbildungsprozesse. Erst eine nähere Auswertung zeigt, dass die Wasserschichten mit den größten Anteilen an Brines (negative Meereisschmelzwasserwerte) 2007 und 2008 eine leicht veränderte Zuordnung haben. Die Wasserschichten mit den größten Anteilen an Brines haben innerhalb der Oberflächenschicht im Sommer 2008 relativ zu 2007 einen höheren Salzgehalt, während sie innerhalb der Bodenschicht 2008 einen niedrigeren Salzgehalt haben relativ zu 2007 (siehe rechter Panel in Abb. 9). Dies deutet darauf hin, dass die Meereisbildung im Win-

ter 2007/2008 ebenso wie vorm Sommer 2007 nicht in die Bodenwasserschicht vordringen konnte, sondern in beiden Jahren nur in die Oberflächenschicht gereicht hat. Dabei blieb die im Jahre 2007 stark durch Meereisbildung beeinflusste Oberflächenschicht anscheinend weitgehend erhalten und wurde durch weitere Polynja-Aktivitäten nur leicht aufgesalzen. Die Bodenwasserschicht erscheint somit weiterhin primär durch den lateralen Eintrag von Wassermassen beeinflusst zu sein, wobei der die Bodenschichten prägende laterale Eintrag im Sommer 2008 im Vergleich zu 2007 einen geringeren Salzgehalt hatte.

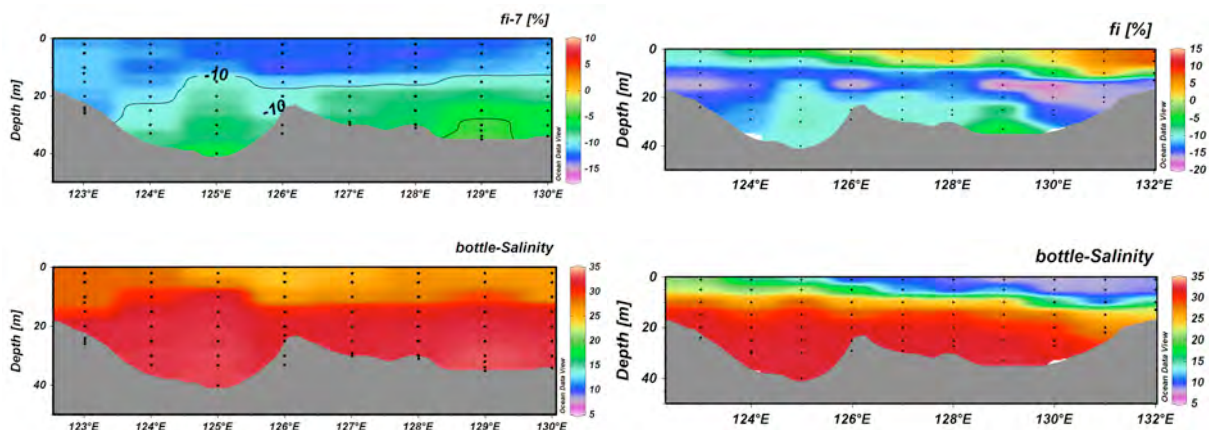
2007**2008**

Abb. 8: Vergleich der Salzgehalte (untere Reihe) und der aus Salzgehalt und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten berechneten Meereisschmelzwassers (obere Reihe; negative Werte entsprechen Eisbildung) zwischen den Jahren 2007 (links) und 2008 (rechts) in der Wassersäule entlang einer Schnitte bei etwa $74,7^\circ\text{N}$.

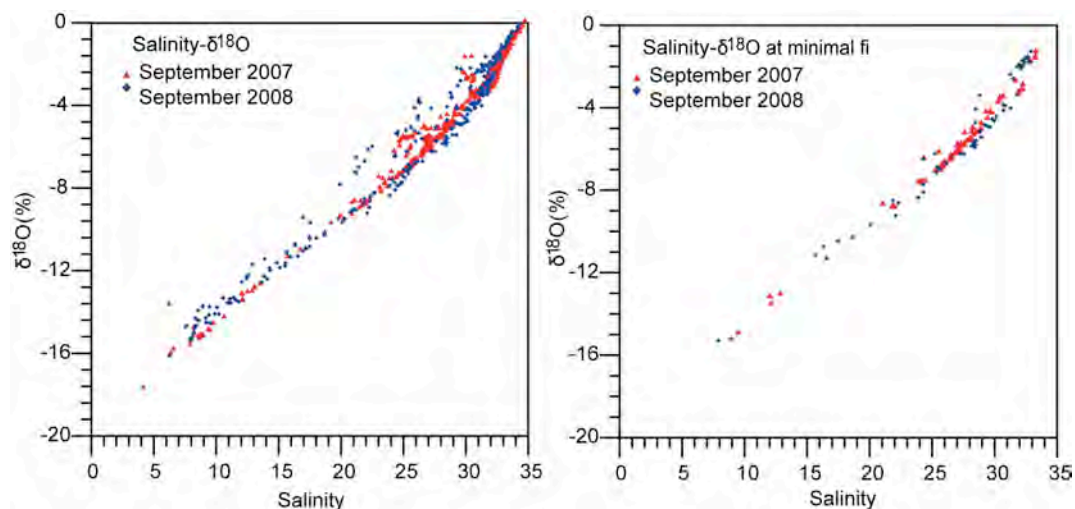


Abb. 9: $\delta^{18}\text{O}$ gegen Salzgehalt für Sommerdaten 2007 und 2008. Im linken Panel sind alle Stationsdaten aus der Laptev-See dargestellt. Im rechten Panel sind von allen Stationen die Werte dargestellt, für die an der jeweiligen Station die höchsten Brine-Werte berechnet wurden (negative Meereisschmelzwasserwerte).

Für die weitere Auswertung wurden für jede einzelne Station ein Inventarwert aus der Tiefenverteilung der Flusswasser- und Meereisschmelzwasseranteile berechnet. Diese Inventarwerte sollen wiederum über die durch die Stationsverteilung abgedeckte Fläche zu Budgets zusammengefasst werden (s. Abb. 10). Dies soll dann einen zwischenjährigen Vergleich ermöglichen. Eine erste Auswertung ergibt deutlich unterschiedliche Budgetwerte für die Jahre 2007 und 2008. Die Unterschiede für die Flusswasserverteilung erstrecken sich sowohl auf den inneren Schelf wie auch über die äußere Laptev-See, wie sie auch schon deutlich in den verschiedenen Salzgehaltsverteilungen zu sehen sind. In der Verteilung des Meereisschmelzwassers liegt ebenfalls eine deutliche Veränderung vor, die vor allem im mittleren und äußeren Schelfbereich liegt.

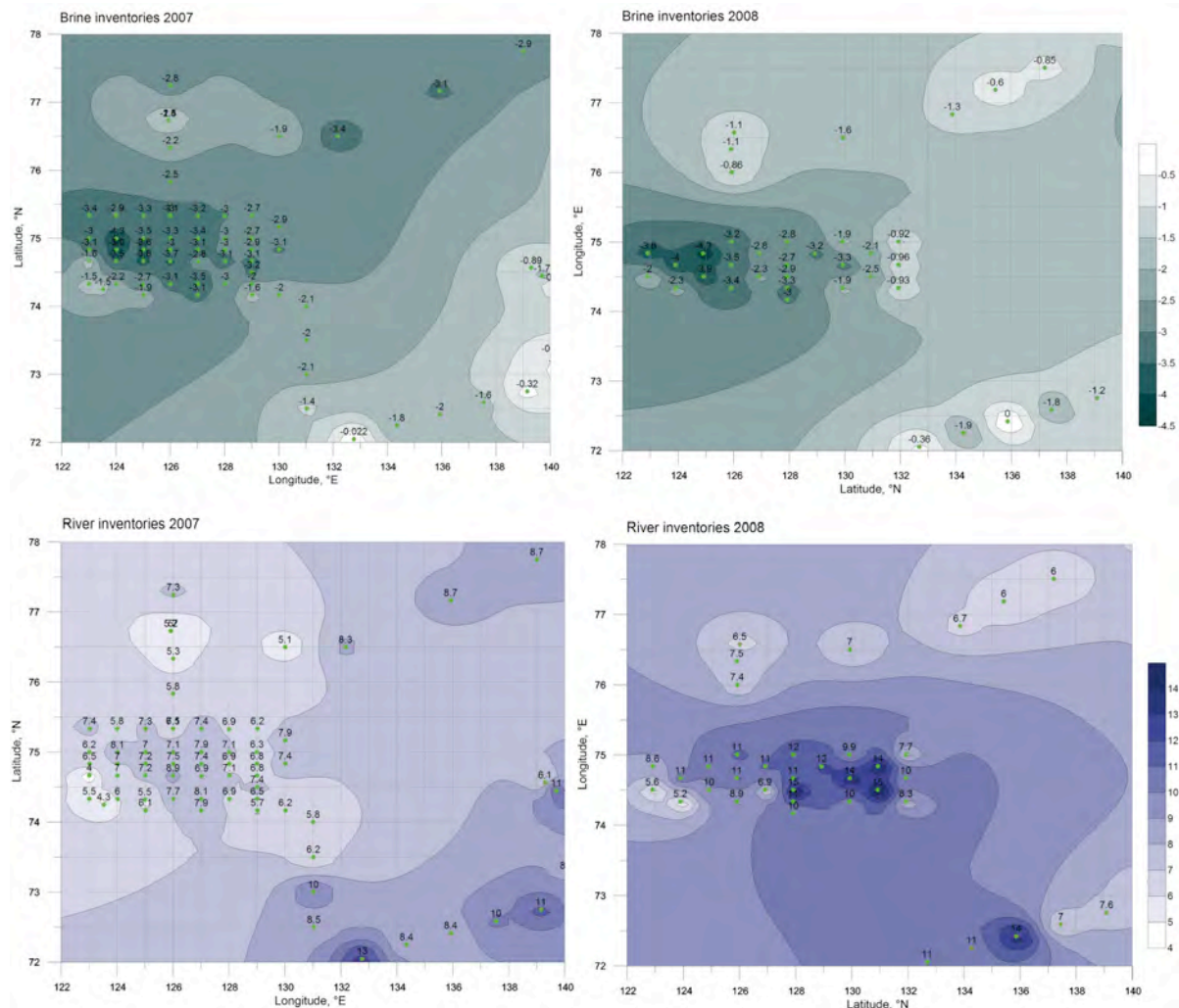


Abb. 10: Räumliche Inventarwerte der Flusswasser- und Meereisschmelzwasseranteile für Sommerdaten 2007 (linker Panel) und 2008 (rechter Panel). In der Darstellung sind die Landflächen nicht dargestellt. Die Interpolation ist durch weitere Stationsdaten in der Ostsibirischen See bei 145°E gestützt, die jedoch nicht mehr mit dargestellt sind.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisse

Die Datensätze aus den Isotopenmessungen werden in Datenbanken archiviert und stehen für eine weitere Nutzung zur Verfügung. Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden in Fachzeitschriften (ISI-gelistet) veröffentlicht und auf internationalen Tagungen präsentiert.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Forschungsergebnisse von dritter Seite bekannt.

TP 4: Änderungen von systemsteuernden Prozessen und Abläufen

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Fernerkundung

Die Arbeiten im Arbeitspaket Fernerkundung des Teilprojektes 4 umfassten drei wesentliche Teilaspekte: 1) die methodische Weiterentwicklung der Ableitung von Meereis- und Polynja-Kenngrößen aus Satellitendaten, 2) die Anwendung dieser Methoden zur Bestimmung der Polynjadynamik und Eisproduktion in der Laptev-See, und 3) die Bereitstellung von Vergleichs- und Referenzdaten für Feldmessungen, Modellstudien und andere Fernerkundungsmethoden (TP 2). Mit Hilfe von passiven, hochaufgelösten Mikrowellendaten (AMSR-E) konnte die mehrjährige Dynamik der Laptev-Polynjen detailliert untersucht werden (Abb. 1).

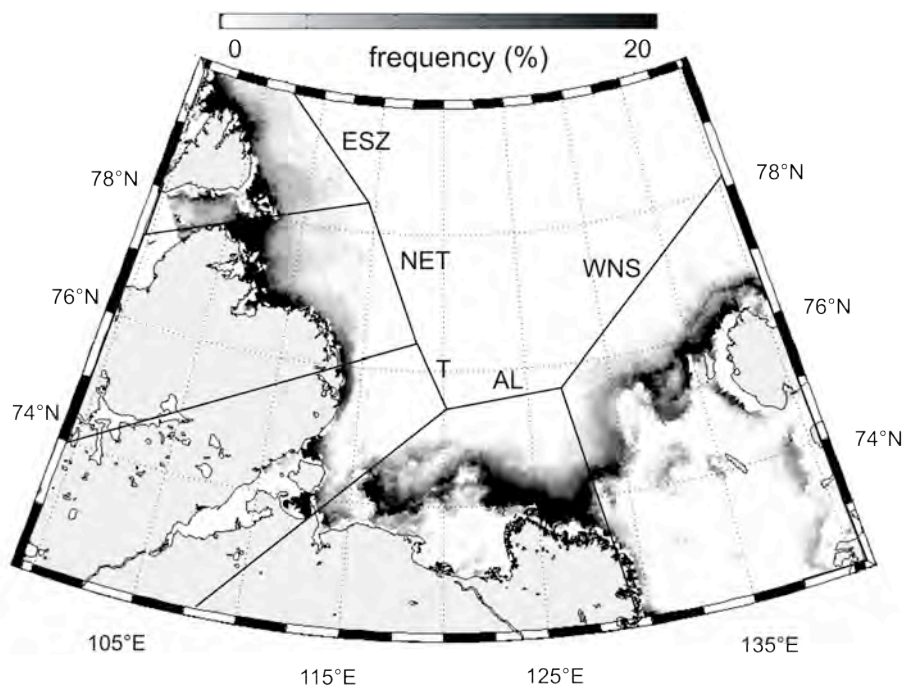


Abb. 1: Polynja-Häufigkeit (Nov-Apr, 2002-2008) aus AMSR-E-Daten und Gebiete der Teilpolynjen (East Severnaya Zemlya (ESZ), Northeastern Taimyr (NET), Taimyr (T), Anabar-Lena (AL) und the Western New Siberian (WNS), aus Willmes et al., accepted).

Für den Zeitraum der Winter-Feldexperimente (TRANSDRIFT XIII, TRANSDRIFT XV) wurden operationell verfügbare Meereiskarten aufbereitet, um hochaufgelöste (MODIS-) Meereiskarten ergänzt und der Expeditionsgruppe zur Verfügung gestellt. Die während der Feldmessungen gewonnenen Daten, insbesondere HEM-Bird (Helicopter Electromagnetic

Bird)-Eisdickenmessungen (TRANSDRIFT XIII, TP 2) wurden dazu verwendet, die derzeit bestehenden Fernerkundungsmethoden zu validieren und zu verbessern. Zu diesen (im Rahmen des Projekts implementierten) Methoden gehören ein Ansatz zur Klassifikation von dünnem Eis und offenem Wasser innerhalb der Polynja auf Basis von Mikrowellen-Strahlungstemperaturen (u. a. Kern et al., 2007), eine Methode zur Bestimmung von Eisdicken aus Oberflächentemperaturen (Yu & Lindsay, 2003; Drucker et al., 2003) sowie eine weitere Methode zur Eisdickenbestimmung, die auf niedriger räumlich aufgelöste, dafür aber langfristig verfügbare Mikrowellen-Strahlungstemperaturen angewendet werden kann (Tamura et al., 2007; Martin et al., 2004, 2005; s. Abschnitt „Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen“). Alle angeführten Verfahren zur Polynja-Charakterisierung wurden mit den HEM-Bird-Messungen (TP 2) für ein ausgeprägtes Polynja-Ereignis am 29.4.2008 kreuzvalidiert (s. Abb. 2). Die Ergebnisse zeigen deutlich die nur begrenzte Übertragbarkeit bzw. die Notwendigkeit der Anpassung von bestehenden Beobachtungsmethoden auf eine Untersuchung der Laptev-See-Polynjen (Willmes et al., 2010). Es zeigt sich aber auch das Potenzial von Scatterometer-Daten mit verbesserter geometrischer Auflösung (Early & Long, 2001) für die Beobachtung von Polynja-Eigenschaften. Dies wird in der zweiten Projektphase einen wichtigen Anknüpfungspunkt mit den SAR-Untersuchungen aus TP 2 darstellen.

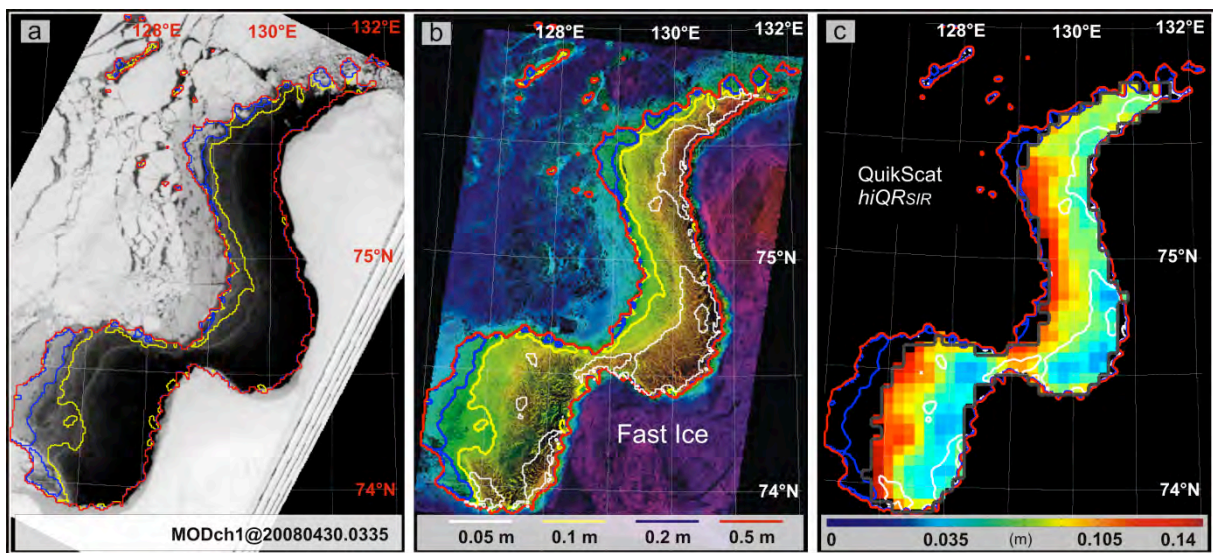


Abb. 2: WNS-Polynja in Fernerkundungsdaten am 30.4.2008: a) MODIS-Kanal 1, Reflexion im sichtbaren Spektralbereich (Grauwerte), b) RGB-Komposit aus Envisat-ASAR-Rückstreuung und AVHRR-Oberflächentemperatur, c) Eisdicken, abgeleitet aus dem Polarisationsverhältnis von QuikSCAT-Rückstreuoeffizienten; jeweils mit Kontourlinien der Eisdicke für 0,05, 0,1, 0,2 und 0,5 m (Legende s. b)). Aus Willmes et al. (2010).

Parallel zur Untersuchung einzelner Polynja-Fallstudien wurde eine Auswertung der Langzeitvariabilität der Polynjadynamik und Eisproduktion in der Laptev-See durchgeführt. Hier-

bei wurden neueste Methoden herangezogen, um erstmals die Menge des in den Polynjen der Laptev-See gebildeten Eises für den Zeitraum von 1980 bis 2008 zu bestimmen (Abb. 3). Sie zeigen vor allem, dass die errechnete Eisproduktion deutlich unter den Werten vorhergehender Studien liegt (Rigor & Colony, 1997; Dethleff et al., 1998; Dmitrenko et al., 2009). Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass der Einfluss von Polynjen und Eisrinnen nicht in jeder dieser Studien voneinander trennbar ist. Insofern ist es in der zweiten Projektphase ein wichtiger Aspekt, die Bedeutung von Eisrinnen für die Netto-Eisproduktion der Laptev-See abzuschätzen.

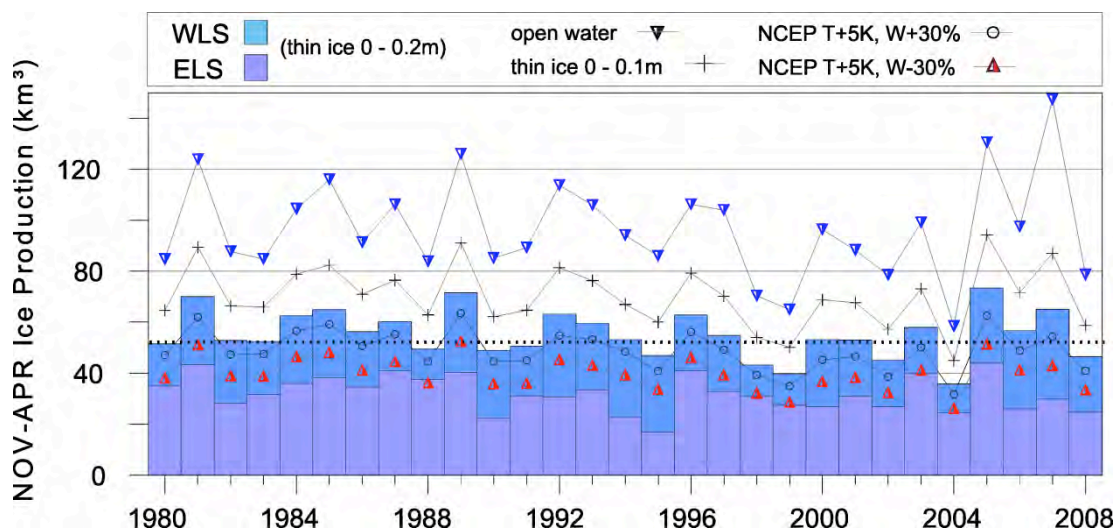


Abb. 3: Eisproduktion (km^3) in den Polynjen der Laptev-See in den Wintermonaten (Nov-Apr) von 1980-2008 (langjähriger Mittelwert $55,2 \text{ km}^3$, gepunktete Linie). Balken: Eisproduktion für die östliche (ELS, hellblau) und die westliche Laptev-See (WLS, dunkelblau). Linien und Symbole: Ergebnisse modifizierter Herleitungsmethoden (nur offenes Wasser in den Polynjen (Dreiecke abwärts), nur Eis bis 10 cm Dicke (plus-Zeichen), modifizierte atmosphärische Eingabedaten (Kreise und Dreiecke aufwärts)). Aus Willmes et al. (accepted).

Ein weiterer Teilaspekt der bislang durchgeführten Arbeiten bestand in der Verwendung von Fernerkundungsdaten (Meereiskonzentrationen und Polynjaklassifikation) zur Evaluierung der Simulationen von Meereis/Ozeanmodellen (NAOSIM, Gerdes et al., 2003; Karcher et al., 2003 und FESOM, Timmermann et al., 2009; Rollenhagen et al., 2009). Die Analyse hinsichtlich einer implementierten Festeiskante zeigt, dass die Simulation der Polynja-Position und -form durch diese Veränderung am Modell beträchtlich verbessert wird (Abb. 4). Aufgrund der Simulation von großen Eisrinnen (NAOSIM) und der groben räumlichen Auflösung (FESOM) wird jedoch die gesamte Fläche offenen Wassers stark überschätzt. Damit wird deutlich, dass weitere Modellverbesserungen notwendig sind, um den entscheidenden Schritt von der Simulation großskaliger Eigenschaften in der Arktis zu einer detailreicheren

Simulation kleinskaliger Eigenschaften (hier Polynjen) in einem arktischen Schelfmeer zu erreichen (TP 4, Meereis-Modellierung; TP 2).

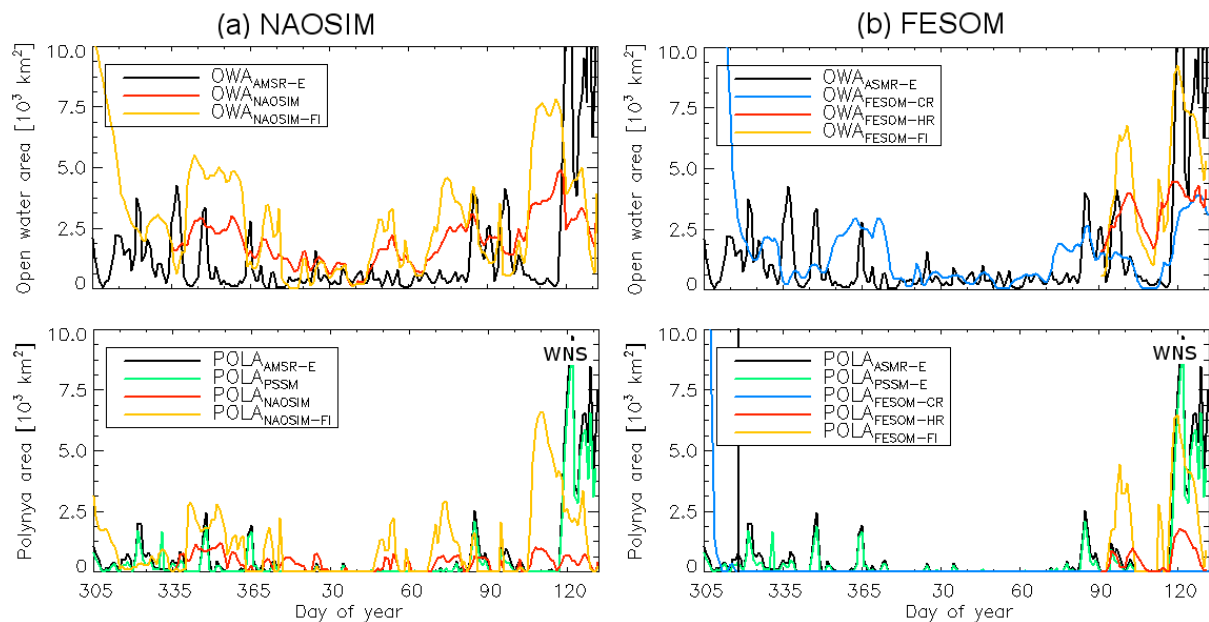


Abb. 4: Zeitreihe der Fläche offenen Wassers (OWA) und der Polynja-Fläche (Meereiskonzentration >70%) vom 1.11.2007 bis 10.5.2008 (für FESOM-HR und FESOM-FI vom 1.4.2008 bis 10.5.2008) in der westlichen neusibirischen Polynja: (a) für NAOSIM. (b) für FESOM. NAOSIM/FESOM-CR = NAOSIM/FESOM mit grober räumlicher Auflösung, FESOM-HR = FESOM mit feiner räumlicher Auflösung, NAOSIM-FI/FESOM-FI = NAOSIM/FESOM-HR mit implementierter Festeiskante. Aus Adams et al. (in revision), verändert.

Mesoskalige Modellierung

Die Arbeiten im Arbeitspaket mesoskalige Modellierung des Teilprojektes 4 umfassten folgende Aspekte: 1) Implementierung eines thermodynamischen Eismoduls in COSMO; Anpassung von COSMO für die Laptev-See und realitätsnahe Simulationen; 2) idealisierte Fallstudien mit COSMO; 3) Anpassung von FESOM für die Laptev-See und realitätsnahe Simulationen; 4) Kopplung von COSMO und FESOM. Die meteorologischen Messungen während TRANSDRIFT XIII und TRANSDRIFT XV waren ebenfalls im Arbeitspaket der mesoskaligen Modellierung enthalten.

Um die hochfrequenten Schwankungen der Eisoberflächentemperatur simulieren zu können, wurde ein thermodynamisches Eismodul in COSMO implementiert (Schroeder et al., accepted) und Simulationen mit 15 km und 5 km Auflösung für die Laptev-See im Dezember 2007, April/Mai 2008 und März/April 2009 durchgeführt. Die räumliche und zeitliche Variabilität der Oberflächen- und 2-m-Lufttemperatur konnte mit den Wetterstationen, die während

TRANSDRIFT XIII und XV entlang der WNS-Polynja aufgestellt wurden, und mit aus MODIS-Daten abgeleiteten Oberflächentemperaturen verglichen werden. Die gute Übereinstimmung, die die Abbildungen 5 und 6 beispielhaft zeigen, dokumentiert die Anwendbarkeit des Meereismoduls. Durch die Modellstudien konnte ein realitätsnaher stündlicher 3-D-Atmosphären-Datensatz mit 5 km Auflösung für die Laptev-See im April 2008 und März 2009 erzeugt werden, der für ungekoppelte Meereisstudien und andere Teilprojekte zur Verfügung steht.

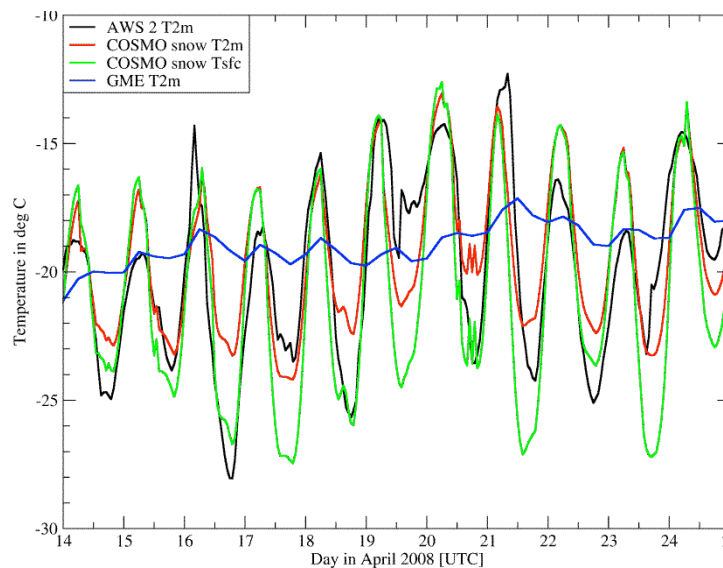


Abb. 5: Vergleich zwischen simulierter und beobachteter 2-m-Temperatur für den Zeitraum vom 14.-25.4.2008 an der Position der automatischen Wetterstation AWS2 (s. Abb. 11, Tsfc = Oberflächentemperatur aus der COSMO-Simulation. Aus Schroeder et al. (accepted).

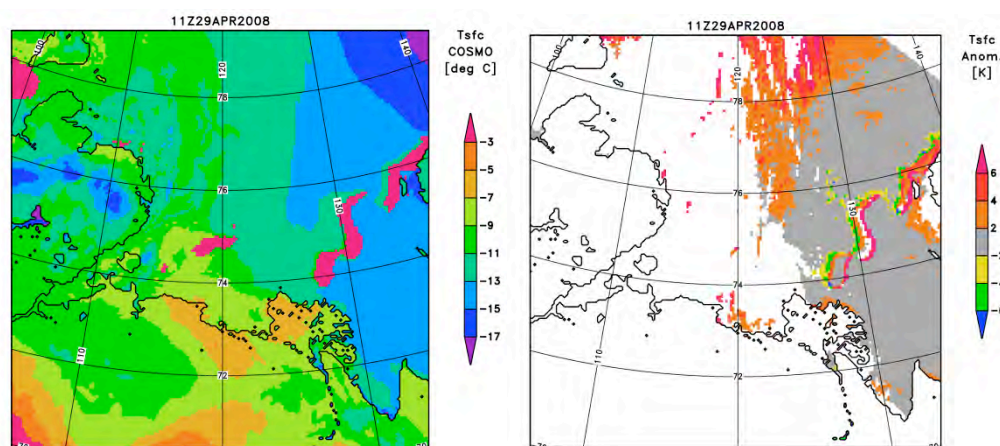


Abb. 6: Oberflächentemperatur (Tsfc) am 29.4.2008 um 11 UTC (19 LT): Links in der COSMO-Simulation und rechts die Differenz zwischen COSMO und MODIS für Bereiche ohne Bewölkung (nach MODIS-Daten). Aus Schroeder et al. (accepted).

Mit idealisierten typischen atmosphärischen Bedingungen wurden COSMO-Simulationen

zum Einfluss der Laptev-See-Polynjen auf die atmosphärische Grenzschicht durchgeführt (Ebner et al., accepted). Unter winterlichen Bedingungen entstehen Temperaturdifferenzen zwischen Eisoberfläche und Wasseroberfläche von bis zu 40 K. Die konvektive Grenzschicht reicht über der Polynja bis zu 1200 m hoch und die maximale Temperaturerhöhung beträgt 5 K (Abb. 7). Der horizontale Einfluss erstreckt sich auf Gebiete bis zu 500 km von der Polynja entfernt. Die turbulenten Wärmeflussdichten erreichen als Summe Maxima von nahe 800 Wm^{-2} über der Polynja. Die potentielle Eisproduktion variiert in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und vorhandenem Dünneis zwischen 8 cm/d und 25 cm/d (Abb. 8).

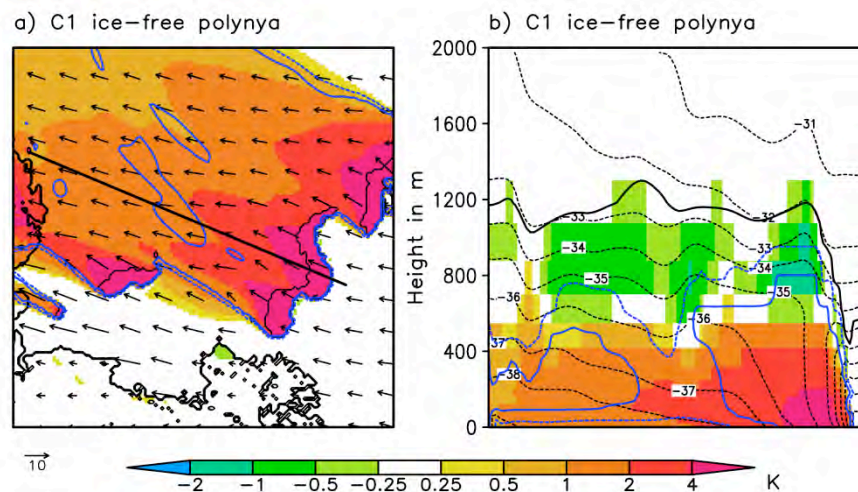


Abb. 7: Differenzen der Lufttemperatur (farbig, in K) zwischen Simulationen mit und ohne Polynjen. Links: 2-m-Lufttemperaturanomalien und 10-m-Windvektoren in ms^{-1} (Gebietsgröße 600km x 600km). Dicke schwarze Linie: Position des Vertikalschnitts (etwa 540 km) auf der rechten Seite. Rechts: potentielle Temperatur (schwarz gestrichelt, Konturintervall 1 K), 0,01 g kg^{-1} -Isolinie der spezifischen Feuchte (dicke schwarze Linie) und 10%/90%-Isolinien des Wolkenbedeckungsgrads (blau gestrichelt/durchgezogen) für die Polynjenläufe (links: blaue Linie = maximaler Wolkenbedeckungsgrad der unteren 2000 m). Aus Ebner et al. (accepted).

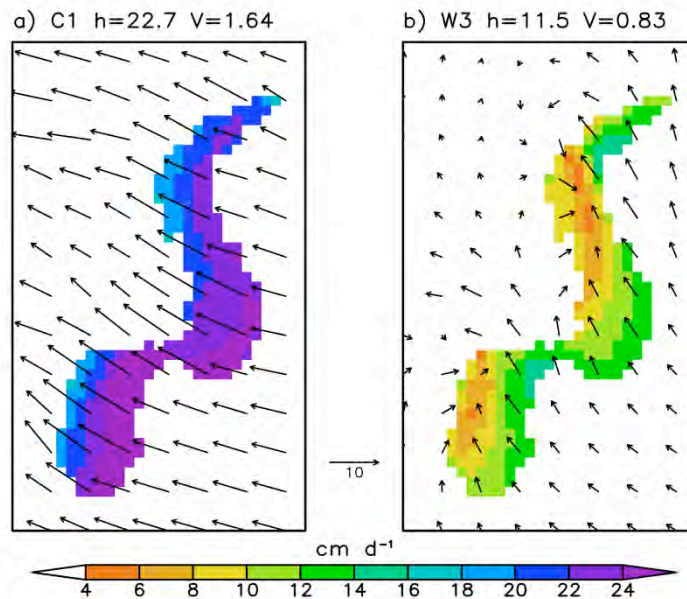


Abb. 8: Potentielle Meereisproduktionsraten in cm d^{-1} (farbig) der WNS-Polynja nach 24h Simulation für verschiedene Umgebungstemperaturen und Windgeschwindigkeiten: a) sehr kalte Temperaturen mit starken Winden und b) kalte Temperaturen mit schwachen Winden. 10-m-Windvektoren in ms^{-1} . Potentielle Meereisproduktionsrate h in cm d^{-1} und produziertes Meereisvolumen V in $\text{km}^3 \text{d}^{-1}$, berechnet als zeitliches und räumliches Mittel über 24 Stunden. Gebietsgröße 150 km x 250 km. Aus Ebner et al. (accepted).

Mit Unterstützung des AWI (Dr. R. Timmermann) wurde das Eis-Ozean-Modell FESOM so für die Laptev-See angepasst, dass das Modellgebiet und alle Gitterpunkte exakt mit der hochaufgelösten COSMO-5km-Version übereinstimmen. Simulationen mit eingebauter Festeisparameterisierung wurden für den April und Mai 2008 durchgeführt. Der Einfluss von unterschiedlichen atmosphärischen Antriebsdaten (tägliche und 6-stündliche NCEP-Reanalysen, 6-stündliche GME-Analysen und stündliche COSMO-Daten) wurde untersucht. Das Öffnen und Schließen der Laptev-See-Polynjen kann insbesondere in der Simulation mit COSMO-Antrieb bemerkenswert realitätsnah simuliert werden (Abb. 9). Eine Validierung der Meereisbedeckung wurde von Adams et al. (in revision) durchgeführt. Die mit FESOM simulierte Eisproduktion in den Laptev-See-Polynjen schwankt zwischen 0 und $1 \text{ km}^3/\text{d}$ (Abb. 10) und ist damit deutlich geringer als in früheren Arbeiten (z. B. Dethleff et al., 1998). Ferner zeigen die FESOM-Simulationen eine Gesamteisproduktion für die Laptev-See, die um den Faktor 5 größer ist als die in den Polynjen. Danach haben die Eisrinnen (leads) eine wesentlich größere Bedeutung in der Laptev-See, als bisher angenommen wird.

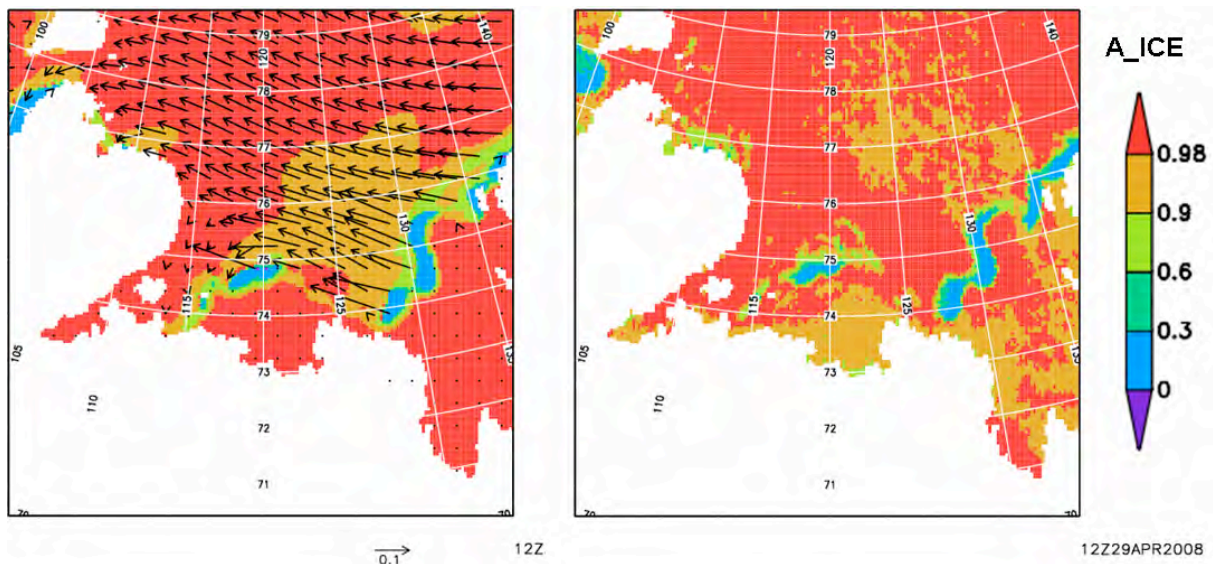


Abb. 9: Links: Eisbedeckungsgrad (A_ICE) und Eisdrift (in m/s) in einer mit COSMO-Daten angetriebenen FESOM-Simulation am 29.4.2008 12 UTC. Rechts: Zum Vergleich der Eisbedeckungsgrad am 29.4. aus AMSR-E.

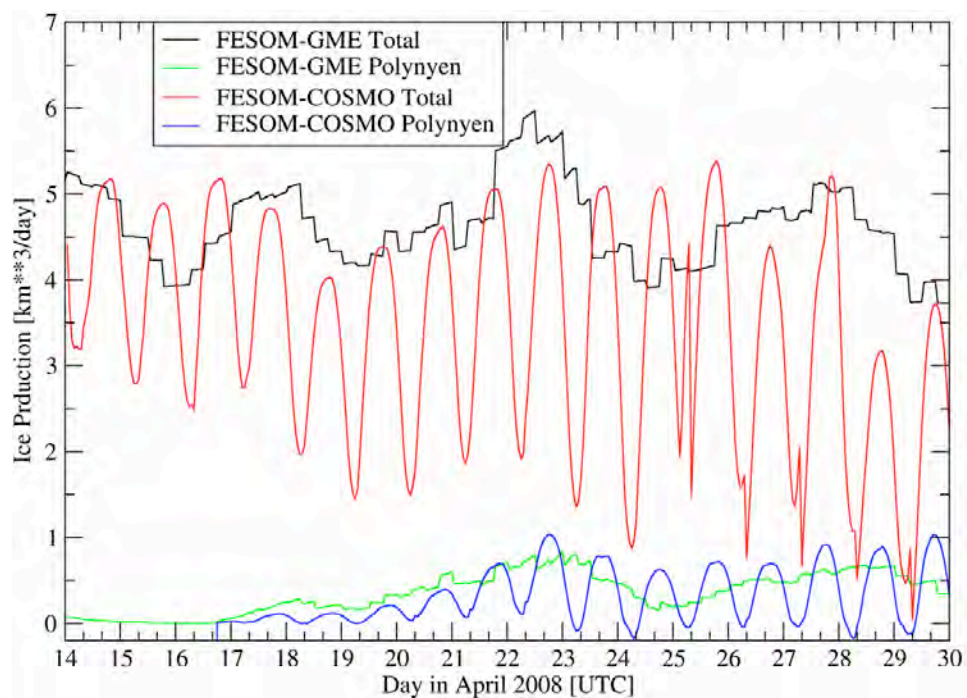


Abb. 10: Simulierte Eisproduktion in der gesamten Laptev-See (Total) und in allen Laptev-See-Polynjen zusammen im April 2008 in FESOM-Simulationen mit COSMO- und GME (Globalmodell des Deutschen Wetterdienstes)-Antrieb.

In der Endphase des Projektzeitraums wurde ein gekoppeltes Modellsystem COSMO-FESOM für die Laptev-See mit 5 km Auflösung erstellt. Alle 15 Minuten werden die Oberflächentemperatur, die Rauigkeit und die Albedo von FESOM nach COSMO übergeben und

andersonherum die 2-m-Temperatur, die 2-m-Feuchte, der 10-m-Wind, die langwellige und kurzwellige Strahlung, die Verdunstung und der Niederschlag. Mehrtägige realitätsnahe Simulationen konnten für den April 2008 durchgeführt werden. Der Tagesgang der Oberflächentemperatur wird in den gekoppelten Simulationen überschätzt. Deswegen werden Verbesserungen der Thermodynamik und der Turbulenzparametrisierung im FESOM in der neuen Projektphase durchgeführt.

Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen waren bisher im Arbeitspaket Modellierung angesiedelt. Während der TRANSDRIFT-XIII-Expedition im Jahr 2008 wurden vier automatische Wetterstationen (AWS) entlang der Festeiskante der WNS-Polynja installiert (Abb. 11).

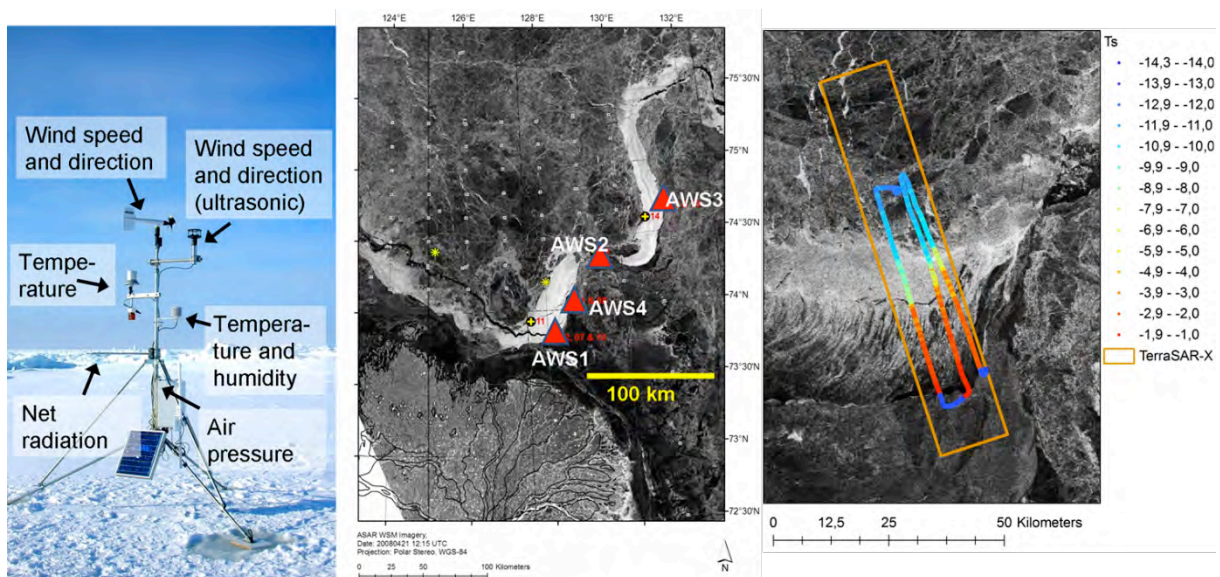


Abb. 11: Links und Mitte: Instrumentierung der AWS und Positionen im April 2008 (SAR-Bild vom 21.4.2008 aus TP 2). Rechts: KT15-Messungen der Oberflächentemperatur im April 2009 (ASAR-Bild vom 15.4.2009 aus TP 2).

Im Zeitraum vom 11.4. bis 29.4.2008 wurden Messungen des Windvektors, der Lufttemperatur und -feuchte, der Strahlungsbilanz und des Luftdrucks durchgeführt. Durch Eisbär-Angriffe wurden zwei AWS stark beschädigt, durch die redundante Instrumentierung für Wind und Temperatur war der Datenverlust relativ gering. Die Daten wurden intensiv für die Validation der meteorologischen Simulationen (s. o.) und von anderen Teilprojekten genutzt. Weitere Details zu den Messungen der AWS finden sich im Daten-Report (Heinemann et al., 2008, <http://www.uni-trier.de/index.php?id=30754>).

Während der TRANSDRIFT-XV-Expedition (März/April 2009) wurden zusätzlich zu AWS-Messungen an zwei Positionen auch hochaufgelöste Horizontalprofile der Oberflächentemperatur (Auflösung 4 m) über der Polynja mittels eines KT15-Infrarotthermometers gemessen. In den Messdaten bildet sich der Übergang vom eisfreien oder mit sehr dünnem Eis bedeckten Teil der Polynja zum Bereich mit zunehmender Eisdicke deutlich ab (Abb. 11). Diese Daten befinden sich zurzeit in Auswertung und sollen in Zukunft dazu verwendet werden, die Fernerkundungsmethoden von Eisdicken im Bereich von 0 bis 50 cm zu verbessern sowie den Prozess des Eiswachstums detailliert zu dokumentieren. Die aus Satellitendaten bestimmten Eisdicken dienen hier wiederum zum Vergleich und als räumlich ausgedehnte Referenzdaten. Wie im Vorjahr wurden die AWS durch Eisbär-Angriffe stark beschädigt.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse sollen wie folgt genutzt werden:

- Publikationen: Artikel in begutachteten Zeitschriften, Publikation von Ergebnissen und Berichten im Internet, Austausch der Ergebnisse national/international, Präsentation auf Konferenzen. Die ersten Ergebnisse des Teilprojektes wurden 2009 zur Publikation eingereicht und sind überwiegend angenommen bzw. schon erschienen. Ergebnisse wurden z. B. auf den EGU-Tagungen, der SCAR/IASC Open Science Conference und dem IAMAS, IAPSO and IACS Joint Assembly in Montréal vorgestellt.
- Validierungsdatensätze und Antriebsdaten: Langzeitliche Datensätze der Dynamik der Laptev-See-Polynja aus Satelliten-Beobachtungen und atmosphärische Daten (Messdaten, GME, COSMO) wurden für andere Teilnehmer des Verbundvorhabens zur Verfügung gestellt und für zahlreiche Studien genutzt. Die Daten können auch zur Verbesserung und Validierung von bestehenden regionalen Klimamodellen in der Arktis, aber auch von Meereis/Ozean-Modellen (AWI-Bremerhaven) verwendet werden.
- Modellentwicklungen: Eine Nutzung der Ergebnisse der Modellentwicklung des COSMO-Modells in Verbindung mit Meereismodellierung findet bereits seit 2007 in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) statt. Das im Verbundvorhaben entwickelte Meereismodul ist in vereinfachter Form in die neueste Version des COSMO-Modells beim DWD implementiert worden und steht daher für die operationelle Wettervorhersage zur Verfügung. Da das COSMO-Modell auch international genutzt wird, insbesondere beim russischen Wetterdienst (Roshydromet), kommen diese Verbesserungen auch anderen Gruppen zugute.

- Weitere Nutzung: Ansprechpartner für eine Nutzung der Projektergebnisse sind auch Wetterdienste der nordischen Staaten sowie Forschungsgruppen, die sich mit Klima- und Ozean/Eis-Forschung und Klimaprognosen in der Arktis befassen. Die Abschätzung der Eisproduktion ist für das Verständnis des arktischen Klimasystems von großer Bedeutung.

Alle vorhandenen Eiskarten werden in regelmäßigen Abständen in ein Datenarchiv eingespeist und können über online-Zugriff von allen Projektteilnehmern eingesehen werden. Die GME-Analysen mit 40 km Auflösung stehen allen anderen Teilprojekten auf dem Daten-server des Verbundes zur Verfügung.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Meereisfernerkundung

Passive Mikrowellensensoren stellen die am häufigsten genutzte Quelle für die Ableitung von Meereis-Kenngrößen dar. Der Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) und das Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) liefern seit 1987 (SSM/I) bzw. 2002 (AMSR-E) täglich Strahlungstemperaturen der Oberfläche im Mikrowellenbereich. Auf Basis dieser Strahlungsmessungen werden operationell und flächendeckend für die Arktis Meereiskonzentrationen auf einem 25-km-Gitter (SSM/I, Comiso, 1990; Comiso, 1999; Cavalieri et al., 1996; Meier et al., 2006) bzw. 6,25-km-Gitter (AMSR-E, Spreen et al., 2008; Cavalieri et al., 2004) bereitgestellt, die in zahlreichen anderen Studien z. B. zur Validation von Meereismodellen verwendet werden. Die im Projekt benutzte Methode zur Ableitung von Polynja-Eigenschaften aus Strahlungstemperaturen im Mikrowellenbereich in Form der Polynja-Klassifikationsmethode (Polynya Signatur Simulation Method PSSM, Markus & Burns, 1995; Kern et al., 2007) wurde von Kern (2009, 2008) verwendet, um eine langjährige Polynjadynamik für die Karasee und die Antarktis zu erstellen. Weiterhin zeigte sich in mehreren Studien, dass sich die Eisdicke von dünnem Eis (0-20 cm) aus Mikrowellen-Strahlungstemperaturen bestimmen lässt (Martin et al., 2004, 2005, 2007; Tamura et al., 2007).

Mesoskalige Atmosphären-Meereis-Modellierung

Operationelle mesoskalige Wettervorhersagemodelle berücksichtigen die Meereisbedeckung oft nur in einer sehr vereinfachten Form. Im WRF-Model (Weather Research and Forecasting Model) wurde von Bromwich et al. (2009) die Mosaikmethode eingeführt mit getrennter Be-

rechnung von Oberflächenflüssen über dem Meereisanteil und dem Anteil offenen Wassers. Gekoppelte Meereis-Ozean-Simulationen mit dem Modellsystem NAOSIM werden für die gesamte Arktis vom AWI durchgeführt (Karcher et al., 2003; Gerdes et al., 2003). Rozman et al. (2010) haben für die Laptev-See einen Festeisbereich vorgeschrieben. NAOSIM wird hier mit einer Auflösung von 8 km betrieben, der atmosphärische Antrieb kommt aber aus NCEP-Reanalysen mit ca. 200 km Auflösung. Die atmosphärischen Antriebsfelder aus den Reanalysen (NCEP oder ECMWF) weisen aber eine geringe räumliche Variabilität für ein Gebiet von der Größe der Laptev-See auf, so dass mesoskalige Antriebe auf die Bildung von Polynjas in dieser Region nicht berücksichtigt werden.

Für den Bereich der gesamten Arktis wurden Simulationen mit dem gekoppelten regionalen Klimamodell HIRHAM-NAOSIM mit 50 km Auflösung durchgeführt (Dorn et al., 2007; Dorn et al., 2009). Da die Polynjen im Bereich der Laptev-See aber häufig eine Breite von weniger als 50 km aufweisen, können sie bei einer Auflösung von 50 km des HIRHAM nicht explizit erfasst werden.